



**Rita Isabel Caetano dos Santos**

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

**INFLUÊNCIA DE AGREGADOS RECICLADOS PROVENIENTES  
DE RCD NO DESEMPENHO DE ARGAMASSA DE CAL AÉREA**

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Fernando Farinha da Silva Pinho, Prof. Doutor, Faculdade  
de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro de 2013



‘Copyright’ Rita Isabel Caetano dos Santos, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

Expresso aqui o meu agradecimento a todos aqueles que contribuíram, directa ou indirectamente, para o desenvolvimento deste trabalho, em particular:

Ao Professor Doutor Fernando Pinho pela sugestão do tema e pela sua orientação ao longo de todo o trabalho. Agradeço pelo estímulo transmitido durante a elaboração deste trabalho, por todo o tempo despendido na partilha e passagem de conhecimentos e pela sua constante disponibilidade.

Ao Eng.º Vítor Silva pela ajuda em toda a campanha experimental desta dissertação, pelas sugestões construtivas, discussões de pontos de vista que muito contribuíram para o bom desenvolvimento desta dissertação e por toda a simpatia e amizade demonstradas.

À empresa Sociedade Gestora de Resíduos, SA, em especial ao Eng<sup>a</sup>. Rui Barros, pelo fornecimento do agregado fino reciclado e pela disponibilização de algum material bibliográfico.

Ao Eng<sup>a</sup>. Victor Vermelhudo da empresa SECIL – Outão, pelo fornecimento do agregado fino normalizado.

Ao Eng<sup>a</sup>. Hugo Fernandes, pelo corte das pastilhas quadradas utilizadas na campanha experimental do presente trabalho.

Ao Sr. Jorge Silvério do DEC – FCT/UNL, pelo auxílio na preparação e realização de alguns ensaios da campanha experimental da presente dissertação.

À D. Maria da Luz e à D. Carla Figueiredo, do DEC – FCT/UNL, pela enorme simpatia, paciência e disponibilidade demonstradas.

A todos os meus colegas, em especial à Ana Barra, pela ajuda na realização de alguns ensaios, à Ana Mana pela ajuda e companheirismo ao longo desta jornada.

À minha irmã, Joana Santos, por todos os momentos apoio e incentivo, por todas as conversas, trocas de ideias ao longo do meu curso e pela maior amizade.

Ao Fábio do Ó, pelo seu apoio inextinguível, pela sua amizade e toda a força transmitida em todos os momentos.

À minha família em especial aos meus pais, o meu pai António Santos e a minha mãe Marina Santos, por me terem dado a oportunidade de desenvolver todo este percurso académico e me apoiarem sempre em todos os momentos da minha vida.



# RESUMO

As preocupações com o ambiente e a gestão de recursos naturais e com o modo como são utilizados na sociedade, em particular no sector da construção, têm vindo a crescer ao longo dos anos. Estas preocupações tornam os resíduos de construção e demolição materiais essenciais ao estudo. Para que estes possam ser reutilizados, é necessário que sejam seguidas directrizes de modo a que as diferenças entre os agregados naturais e reciclados sejam tidas em conta, controlando os efeitos negativos que estes possam originar. Neste sentido a investigação tratada na presente dissertação, desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (DEC – FCT/UNL), estuda o comportamento físico e mecânico de argamassas de cal aérea com agregados finos reciclados, provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD).

Esta linha de investigação enquadra-se no seguimento de uma parceria entre uma empresa de recolha e tratamento de RCD e a FCT/UNL, visando otimizar a reutilização e aplicação proveitosa do agregado fino reciclado.

Inicialmente faz-se um enquadramento geral do tema e análise de outros trabalhos de investigação relacionados com o tema, com base numa pesquisa bibliográfica que incidiu sobre a reutilização de agregados finos reciclados na produção de argamassas de modificação e na caracterização física e mecânica de argamassas de cal aérea.

A caracterização dos agregados finos reciclados, do agregado normalizado (areia de rio) e do ligante, faz-se com base em ensaios de identificação e caracterização física e mecânica. Os resultados obtidos nos ensaios da presente dissertação são apresentados, analisados e comparados com os resultados de outros autores estudados na pesquisa bibliográfica inseridos na temática dos resíduos de construção e demolição.

Considera-se como uma solução viável a utilização de agregado fino reciclado em soluções construtivas em que é necessária uma maior rigidez das argamassas, uma vez que este agregado confere boas características mecânicas às argamassas. As argamassas compostas por agregado fino reciclado estudadas apresentam um comportamento bastante satisfatório, em termos de resistências e comportamento à água.

**Termos chave:** Resíduos de construção e demolição (RCD); agregado fino reciclado; argamassa não estrutural; cal aérea.





# **ABSTRACT**

Concerns about the environment and management of natural resources and how they are used in society, particularly in the construction sector have been growing over the years. These concerns make construction waste and demolition materials essential to the study.

So that they can be reused, it is necessary guidelines are followed so that the differences between the natural aggregates and recycled are taken into account by controlling the negative effects that may lead to.

In this sense, the theme developed in the Department of Civil Engineering Faculty of Science and Technology, Nova University of Lisbon (DEC - FCT/UNL), intends to study the physical and mechanical behavior of lime mortars with recycled fine aggregates, from of construction and demolition waste.

This research falls following a partnership between a company of collection and treatment of RCD and the Department of Civil Engineering of FCT/UNL, aiming to optimize the beneficial reuse and application of recycled fine aggregate.

Initially it is a general framework of the topic and analysis of other research related to the topic, based on a literature review that focused on the reuse of recycled fine aggregate in mortar production modification and physical and mechanical characterization of mortars lime.

The characterization of the recycled fine aggregate, the aggregate normalized (river sand) and a binder, it is based on identification and characterization assays. The mortar in the hardened state, are characterized through behavior for assessing the physical and mechanical characteristics of them.

It is considered as a viable solution to use of recycled fine aggregate in constructive solutions where greater stiffness of mortar is required. This aggregate imparts good mechanical characteristics mortars.

The recycled fine aggregate composed of mortars have studied a very satisfactory performance in terms of behavior and resistance to water.

**KEYWORDS:** Construction and demolition waste, recycled fine aggregate, nonstructural mortar; lime.



# LISTA DE SÍMBOLOS

## SIGLAS

- LER - Lista Europeia de Resíduos  
LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
DEC - Departamento de Engenharia Civil da FCT/UNL  
FCT - Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL  
UNL - Universidade Nova de Lisboa  
RCD - Resíduos de construção e demolição  
RSU - Resíduos sólidos Urbanos  
SGR - Sociedade Gestora de Resíduos, SA  
 $xNyR$  - Provete de argamassa de cal aérea com  $x\%$  de agregado normalizado e  $y\%$  agregado

## NOTAÇÕES ESCALARES LATINAS

- A - Área  
 $a/l$  - Relação água/ligante  
 $b$  - Lado da secção quadrada do provete  
Ba - Baridade  
C - Compacidade  
Cac - Coeficiente de absorção de água por capilaridade  
D - Máxima dimensão do agregado  
DP - Desvio padrão  
 $d$  - Mínima dimensão do agregado; média dos quatro valores medidos ou dia  
Edin - Módulo de elasticidade dinâmico  
Esp - Espalhamento  
F - Força de rotura  
Fc - Força de rotura à compressão  
 $F_f$  - Força de rotura à flexão  
 $f_0$  - Frequência de ressonância longitudinal  
G - Aceleração da gravidade  
H - Lado da secção quadrada do provete ou hora  
Hr - Humidade relativa  
I - Momento de inércia  
L - Comprimento do provete  
 $l$  - Distância entre apoios do suporte do provete  
M - Massa do recipiente preenchido com o material  
 $M_0$  - Massa do provete seco  
 $M_1$  - Massa dos provetes imersos  
 $M_2$  - Massa dos provetes saturados

$M_i$	- Massa do provete no instante $i$
$M_t$	- Quantidade de água absorvida até o instante $t$
min.	- Minuto
MVA	- Massa volúmica aparente
MVR	- Massa volúmica real
P	- Porosidade
PA	- Porosidade aberta
Ppm	- Partes por milhão
Rc	- Resistência à compressão
Rt	- Resistência à tracção por flexão
S	- Área da pastilha circular ou área da face em contacto com a água
T	- Temperatura
t	- Tempo
V	- Volume do recipiente
VA	- Valor assintótico

#### **NOTAÇÕES ESCALARES GREGAS**

$\sigma_a$	- Tensão de aderência associada a cada pastilha
$\sigma'_a$	- Tensão de aderência associada a pastilha quadrada

## ÍNDICE

### 1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais.....	1
1.2. Objectivos da dissertação.....	1
1.3. Estrutura da dissertação .....	2

### 2. ENQUADRAMENTO DO TEMA

2.1. Considerações iniciais .....	5
2.2. Principais aplicações de resíduos no sector da construção .....	6
2.3. Resíduos de construção e demolição (RCD) .....	11
2.3.1. Classificação dos resíduos.....	15
2.3.2. Enquadramento legal da gestão de RCD .....	15
2.3.3. Entidades Gestoras de Resíduos.....	18
2.3.4. Processo de obtenção dos agregados finos reciclados .....	19

### 3. TRABALHOS EXPERIMENTAIS ESTUDADOS

3.1. Considerações iniciais .....	23
3.2. Trabalhos experimentais analisados .....	23
3.2.1. Argamassas de cal aérea.....	24
3.3. Síntese de resultados .....	31

### 4. TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1. Considerações iniciais .....	33
4.2. Materiais utilizados na preparação de argamassas .....	33
4.3. Ensaio de caracterização física dos constituintes das argamassas.....	35
4.3.1. Agregados .....	35
4.3.2. Ligante .....	41
4.4. Preparação das amassaduras .....	41
4.5. Ensaio às argamassas no estado fresco .....	43
4.5.1. Ensaio de consistência por espalhamento.....	43
4.6. Ensaio de caracterização das argamassas endurecidas .....	46
4.6.1. Módulo de elasticidade dinâmico.....	48
4.6.2. Resistências mecânicas à tracção por flexão e à compressão .....	50
4.6.3. Aderência ao suporte .....	52
4.6.4. Absorção de água por capilaridade.....	55
4.6.5. Secagem .....	59
4.6.6. Massa volúmica real, massa volúmica aparente, porosidade aberta. ....	62

4.6.7. Porometria de mercúrio .....	65
4.7. Síntese de resultados .....	70

## **5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS**

5.1. Considerações iniciais .....	71
5.2. Características das argamassas estudadas .....	71
5.2.1. Argamassas em pasta.....	72
5.2.2. Argamassas endurecidas.....	73
5.3. Características de argamassas de outros trabalhos pesquisados. ....	83
5.3.1. Ensaio de Identificação - Caracterização física dos agregados .....	84
5.3.2. Ensaio de Caracterização - Caracterização da argamassa em pasta .....	86
5.3.3. Ensaio de Comportamento - Caracterização da argamassa endurecida .....	86

## **6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

6.1. Considerações Iniciais .....	93
6.2. Conclusões e comentários finais .....	93
6.3. Objectivos propostos e alcançados.....	94
6.4. Propostas para desenvolvimentos futuros .....	94

## **7. BIBLIOGRAFIA .....97**

## **Anexo.....105**

# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Materiais constituintes dos RCD .....	13
Tabela 2.2 - Tipo de perigosidade nos RCD .....	14
Tabela 2.3 - Classificação dos RCD de acordo com a Portaria n.º 209/2004 .....	15
Tabela 2.4 - Processo de valorização dos RCD segundo a SGR .....	22
Tabela 3.1 - Trabalhos analisados de outros autores .....	24
Tabela 3.2 - Resultados dos ensaios de caracterização física das argamassas de cal aérea e areia estudadas por A. Barra .....	25
Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por A. Barra....	25
Tabela 3.4 - Caracterização física dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por F.Pinho .....	26
Tabela 3.5 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por F. Pinho....	26
Tabela 3.6 - Caracterização física dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por C. Barreto.....	27
Tabela 3.7 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por C. Barreto .....	28
Tabela 3.8 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por V. Rato.....	29
Tabela 3.9 - Resultados médios dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por M. Veiga .....	30
Tabela 3. 10 - Resultados médios dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea, areia e tijolo moído estudadas por G. Matias.....	30
Tabela 3.11 - Características físicas dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por P. Faria .....	31
Tabela 3.12 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por P. Faria...	31
Tabela 3.13 - Comparação das características físicas e mecânicas dos provetes de argamassa de cal aérea.....	32
Tabela 4.1 - Resultados médios de baridade dos agregados e ligantes .....	38
Tabela 4.2 - Características físicas dos agregados.....	41
Tabela 4.3 - Proporções dos constituintes das amassadura. ....	41
Tabela 4.4 - Caracterização da composição das argamassas .....	42
Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de consistência por espalhamento .....	45
Tabela 4.6 - Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico.....	49
Tabela 4.7 - Resultados médios de resistência mecânica à tracção por flexão e compressão.....	52
Tabela 4.8 - Resultados médios de aderência ao suporte .....	54
Tabela 4.9 - Tipologia de rotura .....	55
Tabela 4.10 - Resultados médios do coeficiente de absorção de água e valor assintótico .....	58
Tabela 4.11 - Resultados médios do índice de secagem.....	62
Tabela 4.12 - Valores médios de massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta .....	64
Tabela 4.13 - Resultados do ensaio de porometria de mercúrio .....	67

Tabela 5.1 - Relação entre as características das argamassas estudadas.....	71
Tabela I.1 - Valores de baridade de cada amostra de agregado e ligante .....	106
Tabela I.2 - Amostra de agregado normalizado – média de 3 amostras recolhidas na mesma zona.....	107
Tabela I.3 - Amostra de agregado fino reciclado 1 – média das 3 amostras recolhidas na mesma zona .....	108
Tabela I.4 - Amostra de agregado fino reciclado 2 - média das 3 amostras recolhidas na mesma zona.....	109
Tabela I.5 - Amostra de agregado fino reciclado 3 – média das 3 amostras recolhidas na mesma zona. ....	110
Tabela I.6 - Valores obtidos no ensaio de consistência por espalhamento das argamassas .....	111
Tabela I.7 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pela argamassa 0N100R.....	111
Tabela I.8 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pela argamassa 25N75R .....	112
Tabela I.9 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pela argamassa 50N50R.....	112
Tabela I.10 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pela argamassa 75N25R.....	112
Tabela I.11 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pela argamassa 100N0R .....	112
Tabela I.12 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por flexão .....	113
Tabela I.13 - Resultado do ensaio de resistência à compressão.....	114
Tabela I.14 - Resultados do ensaio de aderência ao suporte das argamassas estudadas .....	114
Tabela I.15 - Registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade dos provetes da argamassa 0N100R e argamassa 25N75R.....	115
Tabela I.16 - Registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade dos provetes da argamassa 50N50R, argamassa 75N25R e argamassa 100N0R.....	116
Tabela I.17 - Coeficiente de absorção e valor assintótico dos provetes de argamassa .....	116
Tabela I.18 - Registos das massas durante o ensaio de secagem da argamassa 0N100R, 25N75R e 50N50R .....	117
Tabela I.19 - Registos das massas durante o ensaio de secagem da argamassa 75N25R e 100N0R .....	118
Tabela I.20 - Teor em água durante o ensaio de secagem das argamassas 0N100R, 25N75R e 50N50R ...	118
Tabela I.21 - Registos do teor em água durante o ensaio de secagem das argamassas 75N25R e 100N0R .....	118
Tabela I.22 - Resultados do índice de secagem dos provetes de argamassa 0N100R, 25N75R e 50N50R .....	119
Tabela I.23 - Resultados do índice de secagem dos provetes de argamassa 75N25R e 100N0R .....	119
Tabela I.24 - Massa volúmica real dos proves de argamassa estudados.....	120
Tabela I.25 - Massa volúmica aparente dos proves de argamassa estudados .....	120
Tabela I.26 - Porosidade aberta dos provetes de argamassa estudados .....	121
Tabela I.27 - Valores de ensaio de porosimetria de mercúrio para argamassa 0N100R.....	122
Tabela I.28 - Valores de ensaio de porosimetria de mercúrio para argamassa 25N75R.....	124
Tabela I.29 - Valores de ensaio de porosimetria de mercúrio para argamassa 50N50R.....	126
Tabela I.30 - Valores de ensaio de porosimetria de mercúrio para argamassa 75N25R.....	128
Tabela I.31 - Valores de ensaio de porosimetria de mercúrio para argamassa 100N0R.....	131



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Depósitos ilegais de resíduos de construção e demolição .....	6
Figura 2.2 - Local de recolha do agregado fino reciclado .....	7
Figura 2.3 - Agregado proveniente da trituração de borracha de pneus usados .....	8
Figura 2.4 - Agregado proveniente de tijolo cerâmico .....	9
Figura 2.5 - Agregado de granulado negro de cortiça .....	10
Figura 2.6 - Agregado reciclado de betão.....	11
Figura 2.7 - Tipo de resíduos e a sua percentagem no espaço comunitário .....	12
Figura 2.8 - Composição média dos RCD .....	13
Figura 2.9 - Composição média dos RCD na União Europeia .....	14
Figura 2.10 - Registo da Quantidade de Entidades Gestoras de Resíduos de Construção e Demolição em Portugal Continental .....	19
Figura 2.11 - Equipamento para recolha e transporte de resíduos .....	20
Figura 2.12 - Processo de pré-triagem dos RCD .....	20
Figura 2.13 - Processo de triagem dos RCD.....	21
 Figura 3.1 - Provetes de argamassa dos estudados por A. Barra .....	25
Figura 3.2 - Provetes prismáticos de 16cmx4cmx4cm desmoldados em ambiente de cura por F.Pinho .....	27
Figura 3.3 - Provetes prismáticos de 16cmx4cmx4cm estudados por C. Barreto .....	28
Figura 3.4 - Provetes de argamassas de cal aérea e areia estudadas por V. Rato .....	29
 Figura 4.1 - Materiais utilizados na preparação das argamassas .....	34
Figura 4.2 - Ensaio de determinação da baridade.....	37
Figura 4.3 - Ensaio de determinação da análise granulométrica .....	40
Figura 4.4 - Curva granulométrica do agregado fino reciclado e do agregado fino normalizado.....	40
Figura 4.5 - Preparação das argamassas em pasta .....	43
Figura 4.6 - Ensaio de consistência por espalhamento das argamassas no seu estado fresco.....	44
Figura 4.7 - Enchimento dos moldes dos provetes prismáticos.....	46
Figura 4.8 - Sequência esquemática dos ensaios realizados nos provetes .....	47
Figura 4.9 - Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico .....	49
Figura 4.10 - Ensaio de determinação da resistência mecânica .....	51
Figura 4.11 - Ensaio de aderência ao suporte .....	53
Figura 4.12 - Tipologia de rotura no ensaio de aderência .....	55
Figura 4.13 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	57
Figura 4.14 - Resultados médios de absorção de água por capilaridade.....	58
Figura 4.15 - Resultados médios de absorção de água por capilaridade na 1ª hora de ensaio .....	59
Figura 4.16 - Resultados médios do ensaio de secagem.....	61
Figura 4.17 - Ensaio de determinação da massa volúmica .....	63

Figura 4.18 - Porosímetro de mercúrio e penetrâmetro preparados para o ensaio .....	66
Figura 4.19 - Porosimetria de mercúrio da argamassa 1 - 0N100R .....	67
Figura 4.20 - Porosimetria de mercúrio da argamassa 2 - 25N75R .....	68
Figura 4.21 - Porosimetria de mercúrio da argamassa 3 - 50N50R .....	68
Figura 4.22 - Porosimetria de mercúrio da argamassa 4 - 75N25R .....	69
Figura 4.23 - Porosimetria de mercúrio da argamassa 1 – 100N25R .....	69
Figura 4.24 - Síntese dos ensaios de identificação realizados .....	70
Figura 4.25 – Síntese dos ensaios de comportamento realizados .....	70
Figura 5.1 - Resultados médios de espalhamento, porosidade e quantidade de água das argamassas estudadas.....	72
Figura 5.2 - Relação entre os resultados médios das resistências mecânicas e resultados médios da tensão de aderência .....	73
Figura 5.3 - Relação entre os resultados médios das resistências mecânicas e os resultados médios de porosidade aberta. ....	75
Figura 5.4 - Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico com a massa volúmica aparente e compactidade. ....	76
Figura 5.5 - Valores médios de taxa de secagem e índice de secagem .....	77
Figura 5.6 - Relação entre os resultados médios do valor assintótico e valores de porosidade aberta e índice de secagem .....	78
Figura 5.7 - Relação entre os resultados médios do coeficiente de capilaridade e taxa de secagem .....	79
Figura 5.8 - Log Diferencial intrusão das argamassas ensaiadas.....	80
Figura 5.9- Cumulative Intrusão das argamassas ensaiadas .....	81
Figura 5.10 - Comparação entre massa volúmica real obtida por pesagem hidrostática e por porosimetria .....	83
Figura 5.11 - Resultados do ensaio de baridade de agregado normalizado .....	84
Figura 5.12 - Resultados do ensaio de baridade de agregado reciclado.....	84
Figura 5.13 - Resultados do módulo de finura do agregado normalizado .....	85
Figura 5.14 - Resultados do módulo de finura dos agregados finos reciclados .....	85
Figura 5.15 - Resultados do ensaio de espalhamento .....	86
Figura 5.16 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico.....	87
Figura 5.17 - Resultados do ensaio de determinação das resistências mecânicas à tracção por flexão .....	87
Figura 5.18 - Resultados do ensaio de determinação das resistências mecânicas à compressão .....	88
Figura 5.19 - Resultados do ensaio de aderência ao suporte.....	88
Figura 5.20 - Resultados do ensaio de massa volúmica real.....	89
Figura 5.21 - Resultado do ensaio de massa volúmica aparente.....	89
Figura 5.22 - Resultados do ensaio de porosidade aberta .....	90
Figura 5.23 - Resultados obtidos no coeficiente de absorção de água por capilaridade .....	91
Figura 5.24 - Resultados obtidos de valor assintótico .....	91
Figura 5.25 - Resultados obtidos de índice de secagem .....	92
Figura I.1 - Curva granulométrica do agregado normalizado – média das 3 amostras recolhidas na mesma zona .....	107

Figura I.2 - Curva granulométrica do agregado fino reciclado 1 – média das 3 amostras recolhidas na mesma zona .....	108
Figura I.3 - Curva granulométrica do agregado fino reciclado 2 – média das 3 amostras recolhidas na mesma zona. ....	109
Figura I.4 - Curva granulométrica do agregado fino reciclado 3 – média das 3 amostras recolhidas na mesma zona. ....	110



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Considerações iniciais

A presente dissertação, tem como tema a “Influência de agregados reciclados provenientes de RCD no desempenho de argamassas de cal aérea”, irá desenvolver uma análise comparativa entre argamassas com agregados finos reciclados e argamassas com agregados finos normalizados, sempre utilizando como ligante a cal aérea, esta investigação funciona como contributo ao estudo da reutilização de agregados finos reciclados em argamassas.

O estudo do desempenho de argamassas com agregados finos reciclados, surge da necessidade de minimizar os impactes ambientais ao nível da extracção de areias normalizadas de rio e ao mesmo tempo reaproveitar os resíduos de construção e demolição, que dão origem a agregado fino reciclado. No entanto, quando se trabalha com agregados reciclados, existem variáveis que não seriam contabilizadas no caso do uso de agregados naturais, sendo por isso necessário um estudo comparativo com uma argamassa convencional.

## 1.2. Objectivos da dissertação

O presente trabalho, enquadra-se numa parceria entre uma empresa de recolha e tratamento de resíduos de construção e demolição SGR – (Sociedade Gestora de Resíduos, S.A.) e a FCT/UNL e teve como objectivo principal analisar do ponto de vista experimental, o comportamento físico e mecânico de argamassas cal aérea não estruturais com agregados finos reciclados provenientes de RCD em substituição de agregado normalizado (areia de rio), e contribuir para um melhor conhecimento das características dos RCD, na perspectiva de viabilizar a sua aplicação em argamassas.

Com vista no objectivo proposto, as características físicas e mecânicas a estudar foram a absorção de água por capilaridade, secagem, massas volúmica real e aparente e porosidade aberta e resistência a compressão, resistência a tracção, módulo de elasticidade dinâmico e aderência ao suporte e a porometria.

Foram realizados ensaios de caracterização das propriedades dos constituintes, nomeadamente a determinação da baridade e granulometria dos agregados. Estes ensaios realizam-se em argamassas sempre com o ligante de cal aérea.

As quantidades do agregado normalizado (areia de rio) e do agregado fino reciclado (proveniente de RCD) e ainda do ligante foram alteradas em cada amassadura, de modo a caracterizar o

comportamento de cada argamassa em função das diferentes quantidades e diferente tipo de agregado.

Os resultados dos ensaios nas diferentes argamassas de cal aérea serão comparados e analisados com vista a obter conclusões que justifiquem os objectivos propostos nesta dissertação.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

A dissertação que se apresenta está estruturada em seis capítulos e um anexo.

O **Capítulo I** é o primeiro capítulo da dissertação, onde são apresentados os objectivos do trabalho e é descrita a metodologia seguida e o modo como foi organizada a dissertação;

No **Capítulo II** é feito o enquadramento global do tema, baseado no levantamento do estado da arte. Os aspectos gerais sobre a problemática dos resíduos de construção e demolição no sector de construção, o seu enquadramento legal, os impactes ambientais gerados por estes resíduos e as suas principais características e destino.

No **Capítulo III** descreve-se estudos desenvolvidos relativos à problemática dos resíduos de construção e demolição no sector da construção, através de uma pesquisa bibliográfica. São descritos resultados experimentais de investigações sobre argamassas de cal aérea com modificações face às convencionais.

Os valores resultantes das investigações estudadas neste capítulo serão comparados com os valores obtidos na campanha experimental do presente trabalho.

No **Capítulo IV** é apresentada a campanha experimental, são descritos todos os ensaios realizados (norma e procedimentos) e são apresentados os resultados obtidos.

No **Capítulo V** são apresentados e discutidos os resultados alcançados na campanha experimental nas argamassas com incorporação de finos reciclados e redução do teor de areia normalizada; são justificados os comportamentos observados, quais as suas causas, possíveis erros que possam ter ocorrido durante a fase experimental e, sempre que possível, os resultados obtidos são confrontados e comparados com os de outros autores que foram encontrados em várias pesquisas bibliográficas durante a realização do capítulo III.

No **Capítulo VI** descrevem-se as conclusões a que se chegou durante esta investigação, dando destaque aos principais resultados obtidos sobre a modificação das argamassas convencionais com agregados finos reciclados; são também apresentadas propostas de desenvolvimentos futuros com o objectivo de poder existir uma continuidade do tema.

Em anexo descrevem-se os resultados dos ensaios de caracterização dos provetes de argamassa.

As figuras e tabelas incluídas no texto sem referência bibliográfica foram obtidas pela autora.





## **2. ENQUADRAMENTO DO TEMA**

### **2.1. Considerações iniciais**

Desde os anos 70 do século passado que a questão ambiental se tornou uma preocupação mundial. O desenvolvimento da sociedade, ao nível populacional e da qualidade de vida, levou ao aumento descontrolado do consumo dos recursos e materiais disponíveis na natureza (Lucas, 2011). As preocupações com os recursos naturais e com o modo como são utilizados na sociedade, em particular no sector da construção, têm vindo a crescer. Destas preocupações surgiu a necessidade de introduzir conceitos sustentáveis aplicáveis aos diferentes sectores de actividade da nossa sociedade.

O sector da construção influencia o impacto ambiental que sobre o planeta se faz sentir, tanto na fase de construção, como na fase de utilização dos edifícios, em fase de reconstrução ou demolição.

Surge nos anos 90 em resultado da necessidade de responder e adaptar o sector da construção ao processo de desenvolvimento da sociedade, o conceito de construção sustentável (Lucas, 2011).

Entre alguns impactos de o sector da construção é responsável, salienta-se: o consumo de energia, as emissões de CO<sub>2</sub>, a produção de resíduos e o consumo não controlado de recursos naturais não renováveis (Lucas, 2011).

Em consequência de todos estes factores, tem havido uma preocupação crescente em alcançar novas soluções consideradas de construção sustentável, de modo a garantir um futuro desenvolvimento sustentável do planeta.

A reciclagem de resíduos de construção apresenta vários benefícios do ponto de vista da sustentabilidade, que tem levado diferentes países a adoptarem políticas específicas visando criarem condições para que ela aconteça, segundo (Braga, 2010) as vantagens económicas, sociais e ambientais que resultam da utilização dos resíduos de construção são a preservação dos recursos naturais, que são substituídos por estes resíduos, prolongando a vida útil das reservas naturais e reduzindo a destruição da paisagem, flora e fauna, a redução do volume de aterros e incineração; a redução do consumo energético para a produção de um determinado bem, porque muitas vezes os materiais já incorporam energia; é o caso da reciclagem do aço e do alumínio; é importante também recordar que a deposição de um resíduo num aterro envolve consumo de energia, com o transporte e gestão do aterro.

A redução da poluição emitida pelo fabrico de um mesmo produto, a geração de empregos e o aumento da competitividade da economia; o aumento da durabilidade da construção em determinadas situações, como já comprovado em inúmeros estudos, a possibilidade de redução dos custos de protecção ambiental, ou até mesmo a viabilização de um grau de protecção ambiental superior, pois permite gerar valor a partir de um produto que antes se constituía como uma despesa.

Para que a indústria da construção em Portugal possa ser sustentável, é necessário arranjar uma solução para os milhares de toneladas de resíduos produzidos no decorrer de novas construções e para os resultantes de restaurações ou demolições de construções existentes (AICOPA, 2007).

Deve actuar-se em todo o ciclo de vida do processo, procurando em simultâneo maximizar a valorização dos resíduos, por via da utilização de materiais reciclados e recicláveis e minimizar a produção e perigosidade dos RCD, por via da reutilização e utilização de materiais não susceptíveis de originar RCD contendo substâncias perigosas (Sousa, 2008). Pode observar-se na figura 2.1 imagens de depósitos ilegais de resíduos de construção e demolição.



Figura 2.1 - Depósitos ilegais de resíduos de construção e demolição

Neste capítulo é efectuada um enquadramento geral do tema, à temática da sustentabilidade da construção e aos resíduos de construção e demolição.

Consideram-se as principais características dos resíduos de construção e demolição, o impacto destes resíduos ao nível ambiental, a sua classificação e legislação existente.

É caracterizado o tipo de empresas que tratam destes resíduos a nível nacional, assim como o processo de tratamento dos mesmos, de um panorama global e mais especificamente o trabalho da Sociedade Gestora de Resíduos SGR, que é parte integrante neste trabalho.

## **2.2. Principais aplicações de resíduos no sector da construção**

Apresenta-se em seguida o resultado da pesquisa bibliográfica efectuada sobre a reutilização de resíduos de construção e demolição, industriais e outros na construção.

- Agregado fino reciclado proveniente de RCD

- Agregado proveniente da trituração de borracha de pneus usados.
- Agregado proveniente de tijolo cerâmico
- Agregado proveniente de vidro
- Agregado proveniente de Reboco com Granulado Negro de Cortiça
- Agregado proveniente de betão

### ***Agregado fino reciclado proveniente de RCD***

O conhecimento das propriedades dos agregados finos reciclados provenientes de RCD, desde as suas características individuais ao seu comportamento em argamassas, é importante para analisar a viabilidade de utilização dos RCD.

A utilização de RCD no âmbito deste trabalho é referente à adição deste agregado em argamassas, no entanto estes resíduos também são utilizados na construção de pavimentos rodoviários, nomeadamente em camadas de base e sub-base, que até agora é a forma mais simples e económica de aplicação destes materiais reciclados.

Segundo Gonçalves e Neves (2003), estudos efectuados na Suécia revelaram aumento do módulo de deformabilidade com o tempo de camadas não ligadas onde se usaram agregados reciclados de betão, revelando assim que algumas partículas de cimento se hidrataram, estabelecendo-se ligação entre os grãos. Também no domínio das estradas, os finos podem ser usados para estabilizantes nas bases dos pavimentos rodoviários, absorver manchas de óleo existentes no pavimento ou mesmo regular a acidez dos solos através da elevada alcalinidade do betão (Gonçalves e Neves, 2003). Relativamente ao estudo deste agregado em argamassas, segundo Barra (2011) pode concluir-se que há um aumento do comportamento mecânico das argamassas, nomeadamente ao nível das resistências mecânicas de argamassa de cal aérea. Este aumento pode estar relacionado com a variabilidade dos agregados reciclados de maiores dimensões, que por sua vez, condicionam a resistência mecânica da argamassa. Na figura 2.2 observa-se o local de recolha do agregado fino reciclado na estação de tratamento do mesmo.



Figura 2.2 - Local de recolha do agregado fino reciclado (Barra, 2011)

### ***Agregado proveniente da trituração de borracha de pneus usados***

A influência da incorporação de materiais finos provenientes da trituração de pneus em argamassas é um tema que tem sido bastante estudado no âmbito da sustentabilidade, uma vez que podem ser reaproveitados na construção civil, seja pelo seu valor energético em fornos de cimenteiras, como adição em misturas betuminosas para pavimentação asfáltica ou ainda em argamassas e concretos.

Segundo (Pedro, Diogo André, 2011), a incorporação de agregados provenientes de borracha permite às argamassas adquirir um melhor desempenho a nível de deformabilidade, contudo, existe o inconveniente da sua resistência ser reduzida.

Assim o uso de argamassas constituídas por este tipo de agregado (agregado fino proveniente de borracha) é aconselhado quando a resistência mecânica não é a principal característica, devido ao melhor desempenho a nível de deformabilidade, pode afirmar-se que é aconselhável o uso quando as características de absorção ao impacto, baixa densidade e maior tenacidade, são necessárias. (Pedro, Diogo André, 2011). Na figura 2.3 pode observar-se um depósito de pneus ao ar livre e uma das possíveis utilizações de agregado proveniente da trituração de borracha de pneus usados.



a) Depósito de pneus ao ar livre (Pedro, 2011); b) Primeira obra (EN 370) com betume modificado com borracha utilizando a via seca (Pedro, 2011).

Figura 2.3 - Agregado proveniente da trituração de borracha de pneus usados

### ***Agregado proveniente de tijolo cerâmico***

Neste caso as argamassas estudadas são constituídas por resíduos de tijolo, finamente moídos, de forma a poderem actuar como pozolana, reagindo com a cal aérea e em sua substituição parcial, ou com uma moagem grosseira, com granulometria semelhante a da areia utilizada, e em substituição parcial da mesma. Na figura 2.4 pode observa-se agregado proveniente de tijolo cerâmico moído.



Figura 2.4 - Agregado proveniente de tijolo cerâmico (G. Matias, 2012)

A utilização de resíduos de cerâmica de barro vermelho e a integração dos mesmos em argamassas é uma solução utilizada na reabilitação de edifícios, que pode trazer vantagens do ponto de vista da técnica, na obtenção de características que optimizem as argamassas de cal aérea, e do ponto de vista ambiental.

Há que considerar, que as características das argamassas dependem também do tipo de suporte no qual vão ser aplicadas, das condições ambientais e de aplicação, questões tem que ser tidas em consideração. Segundo G. Matias (2008), foi possível verificar, ao longo do tempo, que o uso de resíduos de tijolo como constituinte de argamassas de cal aérea tem viabilidade e apresenta vantagens a vários níveis, uma vez que, em proporções adequadas de cal, pó e/ou grãos de tijolo e areia, as argamassas com resíduos de cerâmica de barro vermelho do tipo dos analisados podem registar um bom desempenho como argamassas de substituição para rebocos.

#### ***Agregado proveniente de vidro***

Segundo Koller *et al.* (2007), o vidro é uma substância inorgânica, amorfa e fisicamente homogénea, obtida por resfriamento de uma massa em fusão, que endurece pelo aumento contínuo de viscosidade até atingir a condição de rigidez, mas sem sofrer cristalização.

As composições individuais dos vidros são muito variadas, pois pequenas alterações são feitas para proporcionar propriedades específicas, tais como índice de refração, cor, viscosidade, entre outras propriedades. O que é comum a todos os tipos de vidro é a sílica, que é a base do vidro (Penacho, 2012).

As argamassas estudadas são normalmente constituídas por agregado fino de vidro em substituição de areia, muitas vezes em variadas percentagens.

Segundo P. Penacho, a utilização de este tipo de argamassa modificada é tecnicamente viável, sobretudo para percentagens de substituição da areia por agregado fino de vidro da ordem de

20%, apresentando até melhorias, das quais se destaca o comportamento mecânico e a compatibilidade física com o suporte, possibilitando assim novos padrões de construção.

Além destes aspectos positivos, um outro pode ser acrescentado, a possibilidade de formulação de um tipo de argamassa de valor arquitectónico.

#### ***Agregado proveniente de reboco com granulado negro de cortiça***

Segundo M. Martins devido às reconhecidas propriedades térmicas e acústicas que a cortiça apresenta, a inclusão de granulado negro de cortiça surge como uma alternativa às areias para a utilização como agregado em argamassas de reboco.

Investigações empreendida com este tipo de agregado em argamassas servem para avaliar o comportamento a nível térmico, a resistência à colonização por fungos, a dinâmica de absorção e secagem de água e a sua capacidade para receberem um acabamento com tinta, analisando-se também, de forma simplificada, as capacidades destas argamassas perante solicitações mecânicas. Segundo um estudo de M. Martins as maiores potencialidades, que poderão surgir com o uso de argamassas com RNC, estão relacionadas com os ganhos térmicos e uma consequente redução das condensações superficiais em paredes.

Este facto, aliado ao bom comportamento perante uma situação de colonização por fungos, permite afirmar que as argamassas produzidas podem alargar a durabilidade dos rebocos em questão (Martins, 2010). Na figura 2.5 observa-se Agregado de granulado negro de cortiça



Figura 2.5 - Agregado de granulado negro de cortiça (Martins, 2010)

#### ***Agregado proveniente de betão***

A utilização de agregados reciclados de betão na produção de betões estruturais ou argamassas estruturais surge como uma alternativa salutar, tanto do ponto de vista da protecção ambiental, como da sustentabilidade das reservas de naturais.

De um modo geral, os betões com incorporação de agregados grossos reciclados de betão, apresentam uma qualidade aceitável para uma eventual aplicação estrutural, embora,



relativamente à resistência à tracção e ao módulo de elasticidade, se tenha verificado um desempenho inferior comparativamente ao betão de referência (Fonseca, 2009).

Segundo N. Fonseca, o betão com incorporação de agregados grossos reciclados de betão é um material viável e com uma enorme potencialidade de utilização na indústria da construção, mesmo para uma aplicação de carácter estrutural.

O seu comportamento mecânico é aceitável, indiferentemente da taxa de substituição empregue, apresentando, inclusivamente, resistências à compressão equiparáveis às do betão convencional.

Em relação à incorporação de estes agregados em argamassas estruturais, segundo a investigação de Braga (2010) verifica-se em muitas das propriedades estudadas que as argamassas modificadas com agregado proveniente de betão, apresentaram um melhor comportamento do que a argamassa convencional. Verifica-se que a incorporação de finos nas argamassas propicia a melhoria de algumas das propriedades das argamassas de referência, nomeadamente a resistência mecânica, através do denominado efeito de fíler, que permite tornar as argamassas mais compactas, ao diminuir os seus espaços vazios e aumentar assim a sua resistência. Verifica-se também que a incorporação de finos, ao oferecer uma certa coesão e resistência às argamassas, permite reduzir o teor de cimento até a uma determinada quantidade não afectando significativamente as propriedades das argamassas (Braga, 2010). Na figura 2.6 observa-se imagens de agregado reciclado de betão.



a) Aspecto do betão após britagem (Braga, 2010); b) Britagem do betão (Braga, 2010)

Figura 2.6 - Agregado reciclado de betão

### 2.3. Resíduos de construção e demolição (RCD)

Todas actividades desenvolvidas no sector da construção civil são geradoras de resíduos, como alguns dos referidos na secção 2.2, variando assim a sua diversidade em relação à sua origem, quantidade, composição e destino final. Em função do tipo de obra do qual são provenientes, podem ser classificados como: resíduos de construção, resíduos de remodelação, reabilitação e renovação e resíduos de demolição (Algarvio, 2005).

Os resíduos de construção resultam essencialmente de uma deficiente estimativa da quantidade de matérias-primas necessárias, de materiais danificados e desperdícios decorrentes às técnicas e soluções construtivas adoptadas.

Os resíduos provenientes de construção apresentam-se em menor quantidade por obra que os resíduos de demolição, mas com igual variedade de materiais, sendo principalmente constituídos por embalagens e restos de materiais não utilizados ou danificados (Angulo, 2000).

Os resíduos de remodelação, reabilitação e renovação são aqueles que envolvem uma menor quantidade de resíduos por obra, no entanto a sua composição é muito heterogénea, uma vez que as áreas reparadas são variáveis, dependendo do tipo de reabilitação em causa bem como a área a ser intervencionada.

Os resíduos de demolição apresentam-se em maior quantidade, são constituídos maioritariamente por material inerte e solos. A sua composição é função do tipo de obra a ser demolida e do grau de selectividade da demolição (Barra, 2011). Na figura 2.7 observa-se o tipo de resíduos e a sua percentagem no espaço comunitário (Ferreira, 2009).

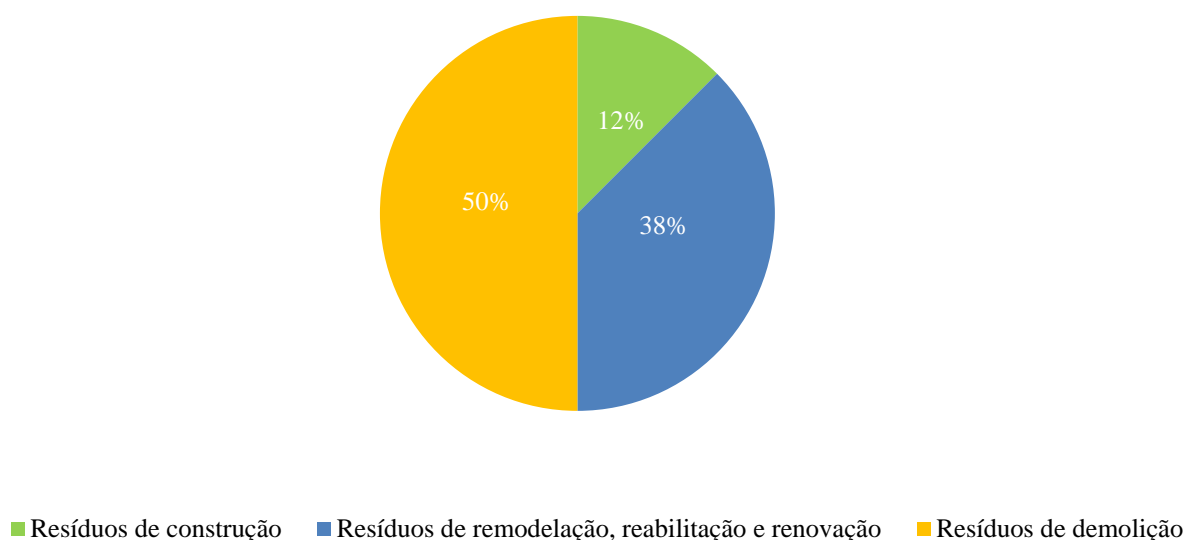


Figura 2.7 - Tipo de resíduos e a sua percentagem no espaço comunitário (Ferreira, 2009)

Os RCD são maioritariamente constituídos por materiais inertes como betão, materiais cerâmicos, vidro e metais, contendo no entanto outros materiais como plásticos, papel, madeira, materiais betuminosos e resíduos perigosos.



Esta composição dos RCD pode variar com vários factores, como a localização geográfica, processos construtivos, época de construção, tipo de obra, entre outros (Gonçalves, 2007). A fracção inerte representa na maioria dos casos cerca 70% do volume total, podendo assumir valores mais expressivos, dependendo do tipo de obra. Na tabela 2.1 identifica-se o tipo de material que constitui os RCD.

Tabela 2.1 - Materiais constituintes dos RCD (Ferreira, 2009)

<i><b>Tipo de Material</b></i>	
Orgânicos	Papel, cartão, madeira, plásticos
Materiais compósitos	Tapetes, revestimentos de paredes de gesso, material eléctrico, madeira prensada, madeira envernizada
Inertes	Betão, betão armado, tijolos, telhas, azulejos, porcelanas, vidro, metais ferrosos, metais não ferrosos, pedra, asfalto, terra

Na figura 2.8 pode observar-se a percentagem média de material que constitui os RCD.

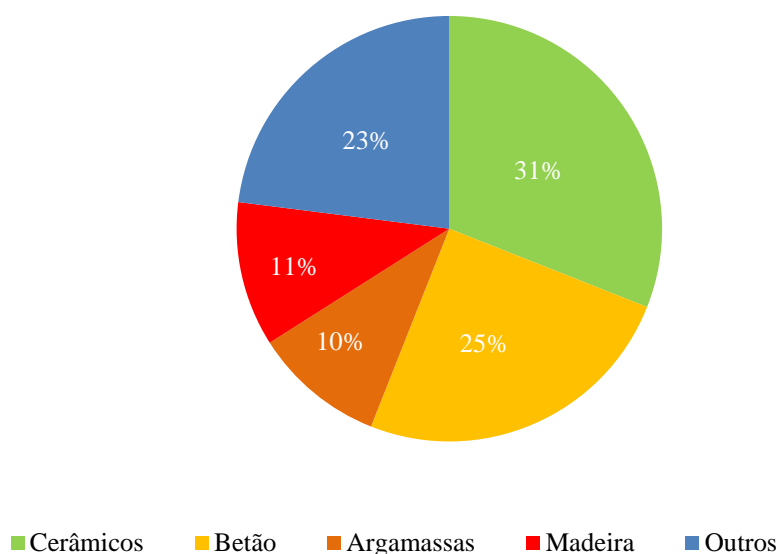


Figura 2.8 - Composição média dos RCD (Gonçalo, 2007)

Segundo o J. Ferreira (Ferreira,2009), a composição média dos RCD na União Europeia é dada por os valores indicados na figura abaixo (figura 2.9).

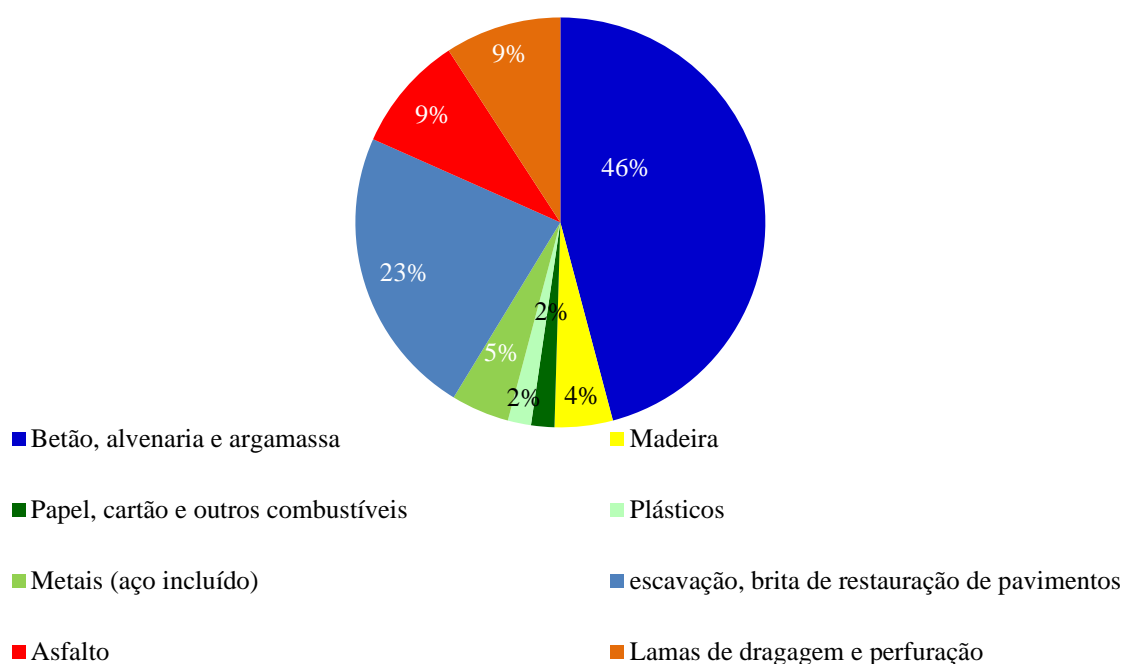


Figura 2.9 - Composição média dos RCD na União Europeia (Ferreira,2009)

Pela análise das figuras 2.8 e 2.9, pode-se concluir que, o material cerâmico e o betão e argamassas são dos materiais mais abundantes na constituição dos RCD, o que se justifica por o facto de estes materiais serem utilizados em maior quantidade em qualquer construção. Segundo o Instituto dos Resíduos (IR), os RCD podem classificar-se em três categorias: inertes; não perigosos e perigosos.

No geral, pode-se afirmar que o tipo de resíduo em estudo no presente trabalho é não perigoso, sendo muitas vezes inerte.

No entanto basta pequenas quantidades de resíduos perigosos (p. ex. amianto, alguns metais pesados como o chumbo, solventes, adesivos, etc.) misturados com o resto dos RCD para levar à caracterização do resíduo como perigoso no seu todo, inviabilizando a sua reaplicação. Na tabela 2.2 identifica-se a origem da perigosidade e apresentam-se exemplos de resíduos nessa situação.

Tabela 2.2 - Tipo de perigosidade nos RCD (Ruivo, Veiga, 2004)

<i>Origem da perigosidade</i>	<i>Exemplos</i>
RCD perigosos, pois os materiais que os originaram continham resíduos perigosos	Amianto, chumbo, alcatrão, tintas, adesivos, agentes ligantes e alguns plásticos
RCD perigosos como resultado do meio onde permaneceram durante anos	Chaminé de uma fábrica por onde durante anos passam gases poluídos, contaminadas as paredes da chaminé
RCD perigosos se materiais perigosos não forem separados ou forem neles misturados	Latas de tinta com chumbo são lançadas para uma pilha de tijolos e betão, tornando-a num resíduo perigoso

Segundo (Pereira, 2002) os resíduos de demolição podem ser classificados consoante o seu destino em:

- Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregado tais como betão e alvenarias;
- Resíduos recicláveis com outros destinos, tais como: plásticos, papel / cartão, metais, vidros, madeiras e outros, devidamente separados por tipo de material;
- Resíduo para o qual não foram ainda desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem / recuperação, tendo no gesso um exemplo claro, e que terão o aterro como destino;
- Resíduos perigosos, oriundos de demolições, reabilitações e restauros, tais como o amianto, CFC's e PBC's, que deverão ser entregues a operadores licenciados.

### 2.3.1. Classificação dos resíduos

Segundo o código LER-Lista Europeia de resíduos da Portaria n.º 209/2004, os diferentes tipos de resíduos são classificados de acordo com a sua fonte geradora.

No âmbito do presente trabalho destacam-se os RCD descritos no capítulo 17 da LER – RCD, incluindo solos escavados de locais contaminados, descritos na tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Classificação dos RCD de acordo com a Portaria n.º 209/2004

<i><b>Material (RCD)</b></i>	<i><b>Código LER</b></i>
Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos	1701
Madeira, vidro e plástico	1702
Misturas betuminosas, alcatrão e produtos de alcatrão	1703
Metais (incluindo ligas)	1704
Solos (incluindo solos escavados de locais contaminados)	1705
Materiais de isolamento e materiais de construção contendo amianto	1706
Materiais de construção à base de gesso	1708
Outros resíduos de construção e demolição	1709

### 2.3.2. Enquadramento legal da gestão de RCD

O sector da construção civil é responsável por uma parte muito significativa dos resíduos produzidos em Portugal, situação comum à generalidade dos demais Estados membros da União Europeia em que se estima uma produção anual global de 100 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) [55].

Estes resíduos apresentam particularidades que dificultam a sua gestão, como a sua constituição heterogénea com fracções de dimensões variadas e os diferentes níveis de perigosidade de que são constituídos.

A actividade da construção civil apresenta também algumas particularidades, tal como o carácter geograficamente disperso e temporário das obras, o que dificulta o controlo da quantidade de resíduos produzidos assim como os locais de depósito dos mesmos e a fiscalização do desempenho ambiental das empresas do sector. Neste enquadramento surge legislação específica para o fluxo dos RCD.

O Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de Março, alterado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, estabelece o regime das operações de gestão de RCD, compreendendo a sua prevenção e reutilização e as suas operações de recolha, transporte, armazenagem, tratamento, valorização e eliminação. Com a publicação do DL73/2011 de 17 de Junho, foi lançada a primeira de uma série de medidas legislativas e normativas no sentido de se colmatarem lacunas de conhecimento, e de se promover a aplicação da hierarquia de resíduos.

A União Europeia estabeleceu, com a publicação da Directiva 2008/98/CE, de 19 de Novembro, do Parlamento Europeu e do Conselho, para 2020 a meta de 70% de preparação para a reutilização, reciclagem e valorização de outros materiais, incluindo operações de enchimento utilizando resíduos como substituto de outros materiais, de resíduos de construção e demolição não perigosos, com exclusão de materiais naturais definidos na categoria 17 05 04 da lista de resíduos. O principal objectivo desta directiva assentou na criação de condições legais para a correcta gestão dos RCD que privilegiassem a prevenção da produção e da perigosidade, o recurso à triagem na origem, à reciclagem e a outras formas de valorização, diminuindo-se desta forma a utilização de recursos naturais e minimizando o recurso à deposição em aterro, o que subsidiariamente conduz a um aumento do tempo de vida útil [55].

Uma das pretensões principais desta directiva é promover a reciclagem de RCD, um desígnio cuja oportunidade veio, entretanto, a ser reforçada com a publicação do Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, que alterou o regime geral da gestão de resíduos e transpôs a Directiva n.º 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Novembro relativa aos resíduos, que estabelece metas de reciclagem de RCD bastante ambiciosas: em 2020, 70 % dos RCD produzidos nos Estados Membros terão de ser encaminhados para reciclagem.

Numa óptica de preservação dos recursos naturais e de promoção da valorização dos resíduos salienta-se ainda a possibilidade de incorporar em obra materiais que incorporem resíduos, como por exemplo as misturas betuminosas modificadas com granulado de borracha de pneus usados (Despacho 4015/2007).

***Plano de Prevenção e Gestão de Resíduos de construção e demolição***

É muito importante que sejam desenvolvidas técnicas construtivas que diminuam o volume do entulho gerado por obras novas, mas apenas isto não resolve o problema. Existem ainda os entulhos de reabilitações e demolições de edifícios que só podem ser combatidos através da educação social para a reciclagem.

A remoção de RCD das obras realiza-se em diversas etapas e em pequenas quantidades de cada vez, o que origina elevados custos de recolha e nos processos de transporte. Uma vez que estes processos são normalmente levados a cabo pelos trabalhadores da construção, a sua produtividade acaba por ser afectada.

Como cerca de 80% dos trabalhos de construção em Portugal são levados a cabo por Pequenas e Médias Empresas (PMEs), o escoamento destes resíduos é muitas vezes realizado sem qualquer coordenação central por parte das empresas individuais (Ferreira, 2009).

A prática actual de construção pode ser alterada através da introdução de uma eficiente gestão de RCD, optimizadora de custos e com poucos resíduos e através da implementação de medidas preventivas relativas à produção de resíduos nas obras.

No entanto, a preocupação com os resíduos produzidos nos diversos sectores da indústria de construção tem crescido ao longo dos últimos anos, começando agora a surgir uma consciência ambiental, que por enquanto está concentrada em grande parte nos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), visto que estes afectam a população de uma maneira mais directa (Ferreira, 2009).

Os RCD são maioritariamente constituídos por materiais inertes, onde não existem preocupações de contaminação por lixiviação, propagação de matérias tóxicas ou inconvenientes de putrefacção de matérias orgânicas como acontece no caso de RSU, existe uma menor preocupação com os RCD, que se encontram num segundo plano da gestão ambiental, no que diz respeito ao tratamento dos resíduos. Neste cenário, a classificação dos RCD ainda suscita algumas dúvidas uma vez que são considerados pelo PERSU (Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos), como um dos fluxos de RSU, e por outro lado são considerados Resíduos Industriais (RI) pelo PESGRI (Plano Estratégico Sectorial de Gestão de Resíduos Industriais) ou até, com grande desvantagem, incluídos na categoria dos Resíduos Industriais Perigosos (RIP) devido à possibilidade da presença de componentes perigosos (Ferreira, 2009).

Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente [56] cabe ao empreiteiro ou ao concessionário da obra executar o PPG, assegurando, designadamente:

- A promoção da reutilização de materiais e a incorporação de reciclados de RCD na obra;
- A existência na obra de um sistema de acondicionamento adequado que permita a gestão selectiva dos RCD;

- A aplicação em obra de uma metodologia de triagem de RCD ou, nos casos em que tal não seja possível, o seu encaminhamento para operador de gestão licenciado;
- Que os RCD são mantidos em obra o mínimo tempo possível, sendo que, no caso de resíduos perigosos, esse período não pode ser superior a 3 meses.

O PPG pode ser alterado pelo dono da obra na fase de execução, sob proposta do produtor de RCD, ou, no caso de empreitadas de concepção-construção, pelo adjudicatário com a autorização do dono da obra, desde que a alteração seja devidamente fundamentada.

O PPG deve estar disponível no local da obra, para efeitos de fiscalização pelas entidades competentes, e ser do conhecimento de todos os intervenientes na execução da obra

### **2.3.3. Entidades Gestoras de Resíduos**

A nível nacional já existe uma diversidade de empresas especializadas para trabalhos de recepção, tratamento e valorização de resíduos provenientes da actividade de construção.

O Decreto-Lei n.º 210/2009, de 3 de Setembro, alterado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho estabelece o regime de constituição, gestão e funcionamento do Mercado Organizado de Resíduos (MOR), bem como as regras aplicáveis às transacções neles realizadas e aos respectivos operadores.

Este diploma vem ainda suprir as necessidades de regulação no âmbito do acompanhamento e controlo, por parte da administração, das actividades das entidades gestoras de mercados organizados de resíduos, assim como da articulação entre as plataformas electrónicas dos mercados organizados e a plataforma SIRAPA (Sistema Integrado de Registo da Agência Portuguesa do Ambiente).

Segundo dados fornecidos por a Agência Portuguesa do Ambiente, a lista de operadores licenciados para a gestão de RCD, classificados na acordo com a Portaria n.º 209/2004, segundo o código 17 - Resíduos de construção e demolição (Incluindo solos escavados de locais contaminados) na lista LER, é fornecida na plataforma SILOGR [57].

Nas regiões autónomas portuguesas, constituídas pelos arquipélagos dos Açores e da Madeira não estão registadas entidades gestoras de resíduos de construção e demolição. Na figura 2.10 observa-se o registo da quantidade de entidades gestoras de resíduos de construção e demolição em Portugal Continental.

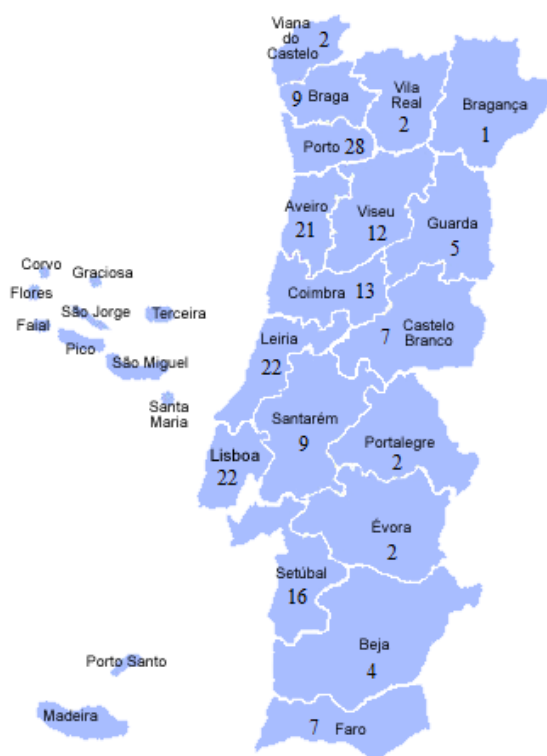


Figura 2.10 - Registo da Quantidade de Entidades Gestoras de Resíduos de Construção e Demolição em Portugal Continental

#### 2.3.4. Processo de obtenção dos agregados finos reciclados

Na realização da campanha experimental, os agregados finos reciclados utilizados nas amassaduras foram fornecidos por a SGR, ao abrigo de uma parceria com a Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa. Neste capítulo vamos explicar a origem destes agregados reciclados segundo o procedimento de trabalho da empresa SGR.

##### **Recepção**

A recepção de resíduos é feita através da recolha, transporte e descarga em equipamento específico, nomeadamente, contentores de 4 a 6 m<sup>3</sup>, consoante o volume de resíduos a recolher, bem como a localização do produtor. Na fase inicial de recepção o contentor é pesado e regista-se o peso líquido da carga, simultaneamente com uma inspeção visual da carga e respectiva classificação prévia da mesma. Os RCD dividem-se em dois grupos, o primeiro tem como base fileiras de RCD triados em obra, que correspondem a um determinado código LER e não têm qualquer tipo de mistura. O segundo grupo corresponde ao código LER 17 09 04, mistura de resíduos de construção e demolição, diz respeito a uma mistura que requer triagem. Na figura 2.11 pode observar-se o equipamento de recolha e transporte de resíduos da respectiva empresa (SGR).



Figura 2.11 - Equipamento para recolha e transporte de resíduos (Barra, 2011)

### ***Pré-triagem***

Depois da pesagem dos contentores, os camiões deslocam-se à zona de pré-triagem, onde os contentores são vazados e onde se confirma o código LER de carga correspondente. A pré-triagem dos RCD, acontece por acção de uma giratória equipada com grifa, que faz uma pré-triagem grosseira, de modo a retirar os resíduos que possam prejudicar o bom funcionamento da linha de triagem, o que acontece devido à dimensão e tipo de certos resíduos, como se pode observar na figura 2.12.



Figura 2.12 - Processo de pré-triagem dos RCD

Os resíduos pré-triados são essencialmente metais ferrosos e não ferrosos, madeira, agregados recicláveis, agregados não recicláveis, pedaços de grandes dimensões de betão com ferro ou sem ferro.



### Triagem

Depois de concluída a pré-triagem e consequente classificação do material, segue-se o processo de triagem, que consiste na separação das porções dos RCD em função da sua natureza.

Na unidade de triagem a pá carregadora deposita o material pré-triado sobre, o alimentador vibrante (figura 2.7a), que além de dosear o material que segue para o transportador de saída, está incorporado com uma grelha que impede a entrada de elementos demasiado volumosos.

Após ser devidamente doseado, o material sobe através de um transportador inclinado (figura 2.7d), que por sua vez é interceptado por um separador magnético (figura 2.7b), que recolhe todos os materiais ferrosos misturados com o material.

De seguida o material entra num crivo rotativo, perfurado com malha de duas dimensões distintas, até metade do seu comprimento é composto por grelhas com perfurações até 20mm e na segunda metade por grelhas com perfurações até 40 mm. Ambas as fracções finas separadas no crivo rotativo caem por gravidade nos transportadores de saída sendo encaminhadas até à parte exterior da unidade, onde ficam depositadas até posterior valorização. Sendo a fracção mais fina, o agregado reciclado utilizado nesta investigação.

A restante fracção grosseira que sai do crivo rotativo é recolhida pelo transportador que atravessa a cabine de triagem, onde manualmente são separados materiais como madeiras, agregados recicláveis, materiais ferrosos e não ferrosos, etc. Após triagem o material restante a ser recolhido cai num contentor aberto situado no pano inferior, finalizando assim o processo de triagem a que o material está sujeito. Na figura 2.13 observa-se imagens do processo de triagem de RCD.



a) Alimentador vibrante; b) separador magnético (Barra, 2011); c) crivo rotativo; d) transportador que atravessa a cabine de triagem; e) interior da cabine de triagem; f) transportador de saída de crivo rotativo.

Figura 2. 13 - Processo de triagem dos RCD

### **Valorização**

Na fase de valorização os resíduos, correctamente separados, dão origem a fileiras triadas de diferentes materiais, aos quais são atribuídos diferentes destinos, identificados na tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Processo de valorização dos RCD segundo a SGR

<b><i>Resíduo Triado</i></b>	<b><i>Produto Final</i></b>
Agregados	Agregados reciclados com três granulometrias
Agregado	Betão britado
Madeira	Estilha
Metais ferrosos e não ferrosos	Metais compactados ou a granel

### **3. TRABALHOS EXPERIMENTAIS ESTUDADOS**

#### **3.1. Considerações iniciais**

Neste capítulo referem-se investigações de outros autores incidentes sobre o comportamento de argamassas de cal aérea com agregado fino reciclado e agregado normalizado.

Nesse sentido, a pesquisa bibliográfica realizada procurou enquadrar o procedimento experimental adoptado neste trabalho e servir de referências aos valores obtidos na presente campanha experimental.

Uma argamassa corrente corresponde a uma mistura ponderada de ligante (cimento, no caso de argamassas cimentícias), agregado fino (areia) e água. O ligante permitirá que ocorra a aglutinação dos agregados, sendo a água responsável pela hidratação do cimento (presa), a partir da qual as propriedades das argamassas se desenvolvem (Penacho, 2012)

Se parte ou a totalidade da areia for substituída por resíduos reciclados de qualquer tipo, a argamassa passa a denominar-se argamassa modificada. Neste capítulo faz-se referência a estudos de argamassas modificadas tendo em conta o rácio dos diversos constituintes, a quantidade de água introduzida na mistura. Variações na formulação de uma dada argamassa traduzem-se em características como o desempenho e durabilidade, que interessam no estudo no presente trabalho.

#### **3.2. Trabalhos experimentais analisados**

A presente dissertação tem como principal objectivo o estudo do comportamento de argamassas de cal aérea com agregado fino reciclado, para uma melhor compreensão do desempenho deste tipo de argamassas. Neste sentido, o trabalho de investigação que serviu de referência e de ponto de partida a este estudo foi realizado no DEC FCT/UNL por A. Barra (Barra, 2011) que é intitulado “Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados”. Em torno do tema de agregado reciclado provenientes de RCD, estão neste momento em desenvolvimento 5 trabalhos de investigação no DEC FCT/UNL.

Verificou-se uma extensa bibliografia, relativa à utilização de agregados reciclados em argamassas de cimento, o que não sucede com a sua utilização em argamassas de cal aérea. Neste sentido, indicam-se também trabalhos de investigação nos quais foram ensaiadas argamassas de cal aérea e agregado normalizado.

### **3.2.1. Argamassas de cal aérea**

Nesta secção, analisam-se resultados obtidos em investigações de outros autores realizadas sobre o comportamento de argamassas de cal aérea com agregados finos reciclados e agregados normalizados.

Os trabalhos consultados nesta secção serão tratados como referência aos valores obtidos na campanha experimental do presente trabalho. Estes trabalhos estão identificados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Trabalhos analisados de outros autores

<i>Autor (es)</i>	<i>Unidade de investigação</i>	<i>Título do Trabalho</i>
A. Barra (2011)	FCT/UNL	Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados.
C. Barreto (2010)		Durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas face à acção de sais solúveis
F. Pinho (2007)		Paredes de alvenaria “ordinária” – Estudo experimental com modelos simples e reforçados
V. Rato (2006)		Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas
P. Faria (2004)		Argamassa de revestimento para alvenarias antigas: contribuição para o estudo da influência dos ligantes
G. Matias (2008)	Universidade de Coimbra	Argamassas de substituição com resíduos de tijolo cerâmico
M. Veiga et al (2004)	LNEC	Conservação e renovação de paredes de edifícios antigos

No estudo realizado por A. Barra (Barra, 2011) foram moldados provetes de argamassas de diferentes constituições para cada tipo de agregado: cal aérea e agregado; cimento e agregado. Nas duas argamassas foram utilizados dois tipos de agregados: agregado fino normalizado e agregado fino reciclado (fracções entre 0 - 20mm).

No interesse do presente trabalho apenas se considerada os resultados da argamassa de cal aérea e agregado fino reciclado (AFR) e argamassa de cal aérea e agregado normalizado (AFN) ambas ao traço 1:4. No início da campanha experimental foram realizados ensaios de caracterização física dos constituintes das argamassas estudadas, nomeadamente a baridade e análise granulométrica.

Na tabela 3.2 apresenta-se os principais resultados médios obtidos.

Tabela 3.2 - Resultados dos ensaios de caracterização física das argamassas de cal aérea e areia estudadas por A. Barra (Barra, 2011)

<i>Material</i>	<i>Baridade [kg/m<sup>3</sup>]</i>	<i>Módulo de finura</i>	<i>D [mm]</i>	<i>d [mm]</i>
Agregado fino reciclado	1556,8	3,2	12,7	0,075
Areia normalizada	1322,9	2,2	1,19	0,149

A baridade da cal aérea das argamassas estudadas por A. Barra foi 326.6 kg/m<sup>3</sup>.

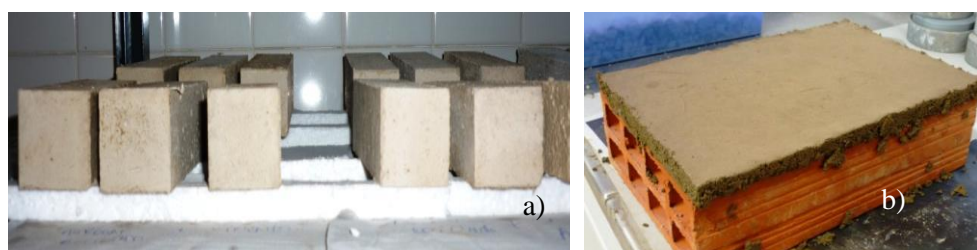
As diferentes argamassas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos de 16cm×4cm×4cm, antes da moldagem dos provetes, foi estabelecido um intervalo de espalhamento a variar entre os 60% e 80%.

Depois de submetidas à cura, em ambiente seco com  $T=20\pm 2$  °C foi efectuada a caracterização das argamassas endurecidas, cujos resultados obtidos se apresentam na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por A. Barra (Barra, 2011)

<i>Características estudadas</i>		<i>Resultados obtidos</i>	
		<i>NCa</i>	<i>RCa</i>
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	5126	2575
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,34	0,4
	Resistência à compressão [MPa]	0,72	1,25
Físicas	Aderência ao suporte [MPa]	0,18	0,16
	Massa volúmica real [kg/m <sup>3</sup> ]	2632,4	1880,3
	Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1880,3	1680,5
	Porosidade Aberta [%]	28,6	36
	Coef. de absorção por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ] <sup>2</sup>	11,47	11,07
	Valor assimpótico [kg/m <sup>2</sup> ] <sup>1</sup>	14,67	20,83

Na figura 3.1 pode observar-se provetes de argamassa dos estudados por A. Barra (Barra,2011)



a) Provetes prismáticos de 16cmx4cmx4cm desmoldados em ambiente de cura, b) provetes rectangulares de 30cm×20cm×1,5cm

Figura 3.1 - Provetes de argamassa dos estudados por A. Barra (Barra, 2011)

O trabalho de investigação realizado no DEC - FCT/UNL por F. Pinho (Pinho, 2007) consistiu na realização de ensaios mecânicos de compressão axial e de compressão de corte, de diversas soluções de reforço aplicadas a modelos experimentais de alvenaria de pedra tradicional.

Apenas serviram de referência as características físicas e mecânicas da argamassa de assentamento dos respectivos muretes de alvenaria de pedra tradicional, construídos posteriormente ao estudo de cada solução de reforço. Estas argamassas eram constituídas por ligante de cal aérea e areia de rio e areeiro como agregado.

As características físicas dos materiais utilizados, apresentam-se na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Caracterização física dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por F.Pinho (Pinho, 2007)

<i>Material</i>	<i>Baridade [kg/m<sup>3</sup>]</i>	<i>Módulo de finura</i>	<i>D [mm]</i>	<i>d [mm]</i>
Areia de rio	1584.4	2.7	2.38	0.149
Areia de areeiro	1539.3	1.8	0.595	0.149

A argamassa de assentamento de cal aérea hidratada da marca Lusical foi produzida ao traço volumétrico 1:3 (cal: areia), sendo as areias de rio e areeiro utilizadas em partes iguais.

Foram moldados mecanicamente provetes de argamassa de várias dimensões, nomeadamente provetes prismáticos de 16cm×4cm×4cm e provetes cilíndricos de diâmetro 5cm e espessura 1,5cm ou 2,5cm (para determinação da aderência ao suporte) para a caracterização mecânica e física das argamassas de cal aérea e areia estudadas. Os resultados da caracterização das argamassas endurecidas aos 90 dias, apresentam-se na tabela 3.5.

Tabela 3. 5 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por F. Pinho (Pinho, 2007)

<i>Características estudadas</i>		<i>Resultados obtidos</i>
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	2310
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,3
	Resistência à compressão [MPa]	0,65
Físicas	Aderência ao suporte [MPa]	0,15
	Massa volúmica real [kg/m <sup>3</sup> ]	2590,1
	Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1742,9
	Porosidade Aberta [%]	32,7
	Coef. de absorção por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]	17,4

Na figura 3.2 apresentam-se os provetes prismáticos de 16cmx4cmx4cm desmoldados em ambiente de cura por F. Pinho.



Figura 3.2 - Provetes prismáticos de 16cmx4cmx4cm desmoldados em ambiente de cura por F.Pinho  
(Pinho, 2007)

Para o estudo realizado por C. Barreto (Barreto, 2010) foram ensaiados provetes de argamassas de cal aérea e bastardas, com o objectivo de avaliar o comportamento das argamassas face à acção dos sais solúveis numa das soluções de reforço anteriormente desenvolvidas no trabalho de investigação realizado por F. Pinho (Pinho, 2007) no DEC - FCT/UNL, descrito anteriormente. Para a presente dissertação serviram de referência apenas os resultados obtidos nos provetes de argamassa de cal aérea e areia ao traço volumétrico 1:3, nos quais foi utilizada cal aérea hidratada em pó da marca Lusical. Na amassadura dos provetes foram utilizadas areias de rio e de areeiro. Os ensaios de caracterização física dos constituintes das argamassas estudadas, foram a baridade e análise granulométrica. Na tabela 3.6 apresentam-se os principais resultados médios obtidos.

Tabela 3.6 - Caracterização física dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por C. Barreto  
(Barreto, 2010)

<i>Material</i>	<i>Baridade [kg/m<sup>3</sup>]</i>	<i>Módulo de finura</i>	<i>D [mm]</i>	<i>d [mm]</i>
Areia de rio	1393,2	2,5	2,38	0,149

A baridade da cal aérea ensaiada foi 290.6 kg/m<sup>3</sup>.

As amassaduras realizadas foram compactadas em moldes prismáticos de 16cmx4cmx4cm (Figura 3.3). Antes da moldagem dos provetes, foi estabelecido um intervalo de espalhamento a variar entre os 60% e 80%. Após terem sido submetidos à cura, em ambiente seco com  $T=20\pm2^{\circ}\text{C}$  e  $Hr=65\pm5\%$ , foi efectuada a caracterização das argamassas endurecidas, cujos resultados obtidos se apresentam na tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por C. Barreto (Barreto, 2010)

<i>Características estudadas</i>		<i>Resultados</i>	<i>Idade [dias]</i>
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	3193	83
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,2	
	Resistência à compressão [MPa]	0,8	
Física	Massa volúmica real [kg/m <sup>3</sup> ]	2593,7	90
	Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1714,1	
	Porosidade Aberta [%]	33,9	
	Coef. de absorção por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]	12,14	
	Valor assíptótico [kg/m <sup>2</sup> ]	15,13	
	Índice de secagem IS	0,021	

Na figura 3.3 observa-se os provetes prismáticos estudados por C. Barreto.



Figura 3.3 - Provetes prismáticos de 16cm×4cm×4cm estudados por C. Barreto (Barreto, 2010)

A investigação realizada por V. Rato (Rato, 2006) teve como objectivo avaliar a relação entre o tipo de ligante e a granulometria das areias, as propriedades da microestrutura morfológica e o comportamento das argamassas. Foram preparadas várias composições de argamassa diferentes que incluíram quatro tipos de ligante (cal aérea, cal hidráulica, cimento branco e um ligante misto composto por cal aérea e cimento Portland corrente) e dezasseis areias de granulometria distinta. Para o presente trabalho serviram de referência os resultados obtidos nos provetes de argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3, nos quais foi utilizada a cal aérea hidratada em pó da marca Lusical.

As argamassas foram preparadas com quatro areias mono granulares e duas misturas de areias, uma vez que a influência da granulometria era um dos parâmetros a avaliar nesse estudo. Para o presente estudo, considerou-se como referência, a areia cuja máxima e mínima dimensão do agregado mais se aproximasse da areia normalizada utilizada no presente trabalho.



Assim sendo serviu de referência a areia com máxima dimensão de 2,36 mm e mínima dimensão 0,5mm. As diferentes argamassas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos de 16cm×4cm×4cm. Estabeleceu-se um intervalo de espalhamento entre os 70 e 75%.

Após terem sido submetidos à cura, em ambiente seco com  $T=23\pm3^{\circ}\text{C}$  e  $Hr= 50\pm5\%$ , foi efectuada a caracterização das argamassas endurecidas aos 60 dias, cujos resultados obtidos se apresentam na tabela 3.8.

Na figura 3.4 observa-se os provetes de argamassas de cal aérea e areia estudadas por V. Rato

Tabela 3.8 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por V. Rato (Rato, 2006)

<i>Características estudadas</i>		<i>Resultados obtidos</i>
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	1793
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,23
	Resistência à compressão [MPa]	0,48
Física	Massa volúmica aparente [ $\text{kg/m}^3$ ]	1705
	Porosidade Aberta [%]	34
	Coef. de absorção por capilaridade [ $\text{kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ ] <sup>2)</sup>	18,36
	Valor assíptótico [ $\text{kg/m}^2$ ]	18,61



Figura 3. 4 - Provetes de argamassas de cal aérea e areia estudadas por V. Rato (Rato, 2006)

Na investigação realizada por M. Veiga (Veiga, et al., 2004) foram estudadas argamassas de substituição, usualmente utilizadas em revestimentos. Para a presente dissertação serviu de referência os valores obtidos na caracterização dos provetes de argamassa de cal aérea e areia ao traço volumétrico 1:3.

Os valores obtidos nos ensaios sobre as argamassas de substituição no seu estado endurecido aos 90 dias apresentam-se na tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Resultados médios dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por M. Veiga (Veiga, et al., 2004)

<i>Características estudadas</i>		<i>Resultados obtidos</i>
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	4400
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0.4
	Resistência à compressão [MPa]	1.0
Física	Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1900
	Coef. de absorção por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> ·h <sup>1/2</sup> ] <sup>2</sup> )	19.2

O trabalho de investigação realizado por G. Matias (Matias, 2008) teve como objectivo avaliar o comportamento de argamassas de substituição com resíduos de tijolo cerâmico. Para tal foram preparadas várias composições de argamassa que incluíram ligantes como cal aérea e cimento e como agregados areia, pó de tijolo e tijolo moído.

Para o presente trabalho serviram apenas de referência os resultados obtidos nos provetes de argamassa de cal aérea e areia ao traço 1:3 (argamassa F), e provetes de argamassa de cal aérea, tijolo moído e areia ao traço 1:1:2 (argamassa I). Os valores obtidos nos ensaios efectuados sobre as argamassas de substituição no seu estado endurecido aos 60 dias apresentam-se na tabela 3.10.

Tabela 3. 10 - Resultados médios dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea, areia e tijolo moído estudadas por G. Matias (Matias, 2008).

<i>Características estudadas</i>		<i>Resultados obtidos</i>	
		F(ca:ar3)	I (ca:gt:ar2)
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	7317	6370
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,34	0,36
	Resistência à compressão [MPa]	0,44	0,48
Física	Coef. de absorção por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> ·h <sup>1/2</sup> ]	5,38	2,91
	Valor assintótico [kg/m <sup>2</sup> ]	0,13	0,15

No trabalho de investigação realizado por P. Faria (Faria, 2004) foram efectuados ensaios experimentais em provetes de diferentes tipos de argamassa, com o objectivo de estudar a influência dos ligantes no comportamento das argamassas, em particular no caso da cal aérea e componentes pozolânicos que com ela podem reagir directamente. Serviu de referência para a presente dissertação a argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3, na qual foi utilizada cal aérea hidratada em pó da marca Lusical e areia de rio, sujeita a peneiração prévia.

Na tabela 3.11 apresentam-se os valores médios obtidos no ensaio de determinação de granulometria de cada constituinte utilizado.

Tabela 3.11 - Características físicas dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por P. Faria (Faria, 2004)

<i>Material</i>	<i>Baridade [kg/m<sup>3</sup>]</i>	<i>Módulo de finura</i>	<i>D [mm]</i>	<i>d [mm]</i>
Areia de rio	1280	2.7	2,38	0,297

A baridade da cal aérea é 570 kg/m<sup>3</sup>.

As argamassas realizadas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos de 16cm×4cm×4cm. Antes da moldagem estabeleceram-se valores médios de espalhamento de 74% para as argamassas de cal aérea. Após terem sido submetidos à cura, em ambiente seco com  $T=23 \pm 3$  °C e  $Hr=50 \pm 5\%$ , foi efectuada a caracterização das argamassas endurecidas. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por P. Faria (Faria, 2004)

<i>Características estudadas</i>		<i>Resultados obtidos</i>
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	2300
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,33
	Resistência à compressão [MPa]	0,65
Física	Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1720
	Porosidade Aberta [%]	34
	Coef. de absorção por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]	22,2
	Valor assintótico [kg/m <sup>2</sup> ]	18,1

### 3.3. Síntese de resultados

Nesta secção são sintetizados os principais resultados relativos às investigações de outros autores. Na tabela 3.13 apresenta-se os resultados de outras investigações observados e os resultados obtidos na campanha experimental do presente estudo. Tendo em conta as variabilidades presentes entre os trabalhos observados, considera-se sempre constante o ligante de cal aérea.

Tabela 3.13 - Comparação das características físicas e mecânicas dos provetes de argamassa de cal aérea.

Autor	Material		Idade [dias]	Características físicas										Características mecânicas				
				Ba [kg/m <sup>3</sup> ]	D [mm]	d [mm]	MF	Esp [%]	Cac [kg/m <sup>2</sup> m <sup>1/2</sup> ]	VA [kg/m <sup>2</sup> ]	MVR [kg/m <sup>3</sup> ]	MVA [kg/m <sup>3</sup> ]	PA [%]	Edin [MPa]	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Ader. [MPa]	IS
A. Barra	NCa	Areia norml.		1322,9	1,19	0,149	2,2											
		Cal aérea		326,6	-	-	-											
		Arg. em pasta						77,3										
		Arg. endur	90						11,47	14,67	2632,4	1880,3	28,6	5126	0,34	0,72	0,18	-
	RCa	Agregado fino reciclado		1556,8	12,7	0,075	3,2											
		Arg. em pasta						78,5										
		Arg. endur	90						11,07	20,83	1880,3	1680,5	36	2575	0,4	1,25	0,16	-
F. Pinho	Arg. em pasta							81										
	Arg. endur.		90						32,7	17,4	2590,1	0	1742,9	2310	0,3	0,65	0,15	-
C. Barreto	Areia de rio			1393,2	2,38	0,149	2,5											
	Cal aérea			290,6	-	-	-											
	Arg. em pasta							69										
	Arg. endur		90						12,14	15,13	2593,7	1714,1	33,9	3193	0,2	0,8	-	0,021
V. Rato	Areia de rio			-	2,36	0,5	-											
	Cal aérea			-	-	-	-											
	Arg. em pasta							65										
	Arg. endur		60						18,36	18,61	-	1705	34	1793	0,23	0,48	-	-
P. Faria	Areia rio			1280	2,38	0,297	2,7											
	Cal aérea			570	-	-	-											
	Arg. em pasta							74										
	Arg. endur		60						22,2	18,1	-	1720	34	2300	0,33	0,65	-	-
G. Matias	F (ca:ar3)	Arg. em pasta						-										
		Arg. endur	90						5,38	0,13		-	-	7317	0,34	0,44	-	-
	I (ca:gt:ar2)	Arg. em pasta						-										
		Arg. endur	90						2,91	0,15	-	-	-	6370	0,36	0,48	-	-
M. Veiga et	Arg. em pasta							81										
	Arg. endur		90						19,2	-	-	1900	-	4400	0,4	1	-	-

## **4. TRABALHO EXPERIMENTAL**

### **4.1. Considerações iniciais**

O trabalho experimental descrita neste capítulo visa avaliar o comportamento de argamassas de cal aérea com inclusão de agregado reciclado proveniente de RCD. O objectivo principal desta campanha prende-se com a determinação da influência do tipo de RCD mencionado em substituição da areia. Moldaram-se provetes para cinco argamassas de diferentes constituições, variando o tipo e a quantidade de agregado. Em relação ao traço adoptou-se, para todas as argamassas um traço em volume de 1:3, uma vez este ser um traço comum em argamassa de cal aérea.

No presente capítulo são definidos os constituintes utilizados na preparação das argamassas e descritos detalhadamente os diversos ensaios a realizar, tanto aos constituintes das argamassas (areia, agregado reciclado proveniente de RCD e cal aérea) e às argamassas.

Em cada ensaio realizado na campanha experimental, procura-se introduzir algumas noções básicas e fundamentais acerca de cada um, a normalização seguida, o equipamento, procedimento, e a forma de obter e abordar os resultados.

O trabalho experimental apoia-se em três tipos de ensaios:

- Ensaios de identificação, realizados sobre os constituintes das argamassas;
- Ensaios de caracterização, realizados às argamassas no estado frescos e endurecido;
- Ensaio de comportamento físico e mecânico, realizados às argamassas no estado endurecido.

### **4.2. Materiais utilizados na preparação de argamassas**

Utilizou-se agregado fino normalizado e agregado fino reciclado (fracções entre 0-20mm). Considerou-se sempre como ligante a cal aérea.

#### ***Agregado***

Nas cinco amassadura foram utilizados agregados finos reciclados e agregados finos normalizados na obtenção dos provetes de referência. O agregado normalizado foi disponibilizado

pela empresa SECIL, figura 4.1 a), e o agregado fino reciclado foi recolhido das instalações de recepção, tratamento e expedição de RCD da empresa SGR, figura 4.1 b).



a) Agregado fino normalizado; b) cal aérea; c) Agregado fino reciclado.

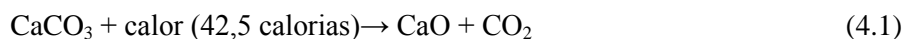
Figura 4.1 - Materiais utilizados na preparação das argamassas

### **Ligante**

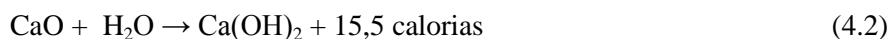
O ligante utilizado na realização dos provetes de argamassa foi a cal aérea hidratada em pó da marca Lusical (Figura 4.1 c).

A cal aérea resulta da decomposição, segundo a acção da temperatura, de uma rocha com percentagem não inferior a 95% de carbonato de cálcio, ou de cálcio e magnésio (Pinho, 2007).

Da cozedura destes calcários, a 894°C, resulta a “cal viva” (óxido de cálcio), de acordo com a seguinte reacção química (calcinação) (Coutinho, 1997):



A combinação da cal viva com água (por imersão ou aspersão), leva à sua “extinção” numa reacção fortemente exotérmica e expansiva, de acordo com a seguinte reacção química (Pinho, 2007):

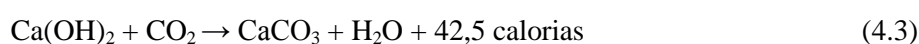


Esta reacção química, denominada de hidratação, transforma o óxido de cálcio em hidróxido de cálcio, em “cal apagada” também denominada cal hidráulica ou apenas cal (Pinho, 2007).

A extinção da cal dá-se com uma forte libertação de calor, que pode levar a temperaturas superiores a 100°C.

Quando a extinção ocorre por emersão, obtém-se uma pasta que se pode conservar ao longo do tempo, sem carbonatar (endurecer), podendo ser utilizada em argamassas.

Após a sua aplicação, dá-se o seu endurecimento por carbonatação, quando o hidróxido de cálcio reage com o dióxido de carbono da atmosfera, dando origem a carbonato de cálcio ou calcite, de acordo com a seguinte reacção química (Pinho, 2007):



O carbonato de cálcio assim obtido, apresenta propriedades que a rocha original não possuía, nomeadamente o desenvolvimento das suas características de ligante após ser misturado com água (Pinho, 2007).

As argamassas de cal aérea e areia apresentam resistências mecânicas pouco elevadas, baixos módulos de elasticidade e aderência ao suporte. No entanto, permitem que as argamassas tenham maiores deformações, sem fissuração (Coelho, et al., 2009).

### *Água*

Na realização deste trabalho a água utilizada é proveniente da rede pública de abastecimento da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, FCT/UNL, para a realização dos provetes de argamassa. A quantidade de água adicionada à mistura varia em função da trabalhabilidade pretendida.

## **4.3. Ensaio de caracterização física dos constituintes das argamassas**

### **4.3.1. Agregados**

De modo a caracterizar fisicamente os agregados utilizados na realização das amassaduras, realizou-se o ensaio da baridade e o ensaio da granulometria em ambos os agregados, o normalizado e o agregado reciclado proveniente de RCD.

#### *Ensaio de Baridade*

A baridade é definida como a relação entre a massa de uma quantidade de agregado e o volume ocupado pelo mesmo, incluindo os espaços de ar entre as partículas (Barra, 2011).

Os resultados deste ensaio indicam a quantidade exacta de cada material na constituição das amassaduras realizadas.

A determinação da baridade (Ba) segue a expressão:

$$Ba = \frac{M}{V} \text{ [Kg/m}^3\text{]} \quad (4.4)$$

Sendo:

M (kg) a massa do recipiente preenchido com o material (descontando a massa do recipiente);

V (m<sup>3</sup>) o volume do recipiente.

Ambos os agregados e o ligante foram submetidos ao ensaio da determinação da baridade, utilizados na preparação das argamassas, tendo como referência a ficha de ensaio Fe 15 (UNL/FCT, 1996).

Os cálculos para a determinação da baridade foram realizados para converter o traço volumétrico (volume), em traço ponderado (peso), para a obtenção da quantidade necessária de ligantes e agregados utilizados, na proporção que se considerou de 1:3.

De seguida apresenta-se o procedimento e os equipamentos usados no ensaio de determinação da baridade dos agregados e ligante. Na figura 4.2 apresenta-se imagens do ensaio de determinação da baridade.

### **Equipamento**

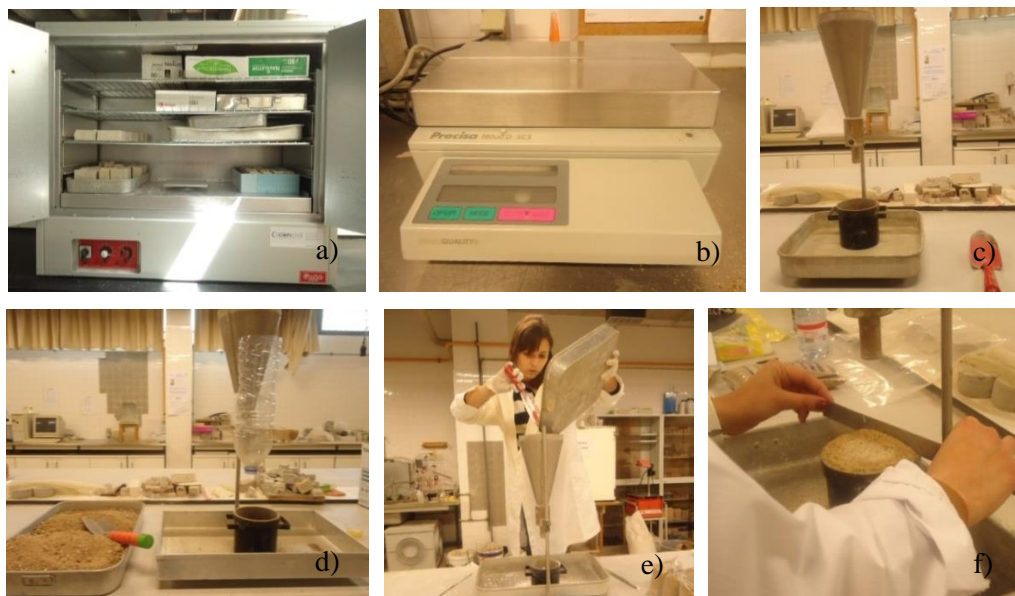
- Estufa ventilada;
- Balança de precisão de 0.1g;
- Recipiente metálico cilíndrico;
- Funil metálico em suporte de altura regulável;
- Régua metálica;
- Garrafa de água de 1,5 l;
- Tabuleiros.

### **Procedimento**

- Pesou-se o recipiente metálico vazio e limpo;
- Tarou-se o recipiente metálico vazio e limpo;
- Esquartelou-se o material em quatro partes iguais;



- Colocou-se o material (agregado ou ligante) no recipiente através do funil metálico em suporte de altura considerável; o recipiente foi colocado a uma distância entre o seu aro superior e o bordo inferior do funil de 50mm, para garantir igual compactação, assegurou-se que a altura de queda dos materiais não seja variável;
- Removeu-se o material excedente com uma régua metálica;
- Pesou-se na balança, o recipiente metálico preenchido (M).



a) estufa ventilada; b) balança de precisão 0,1g; c) material e equipamento para ensaio; d) garrafa de água de 1 litro para ensaio de material mais grosseiro; e) passagem do material durante a realização do ensaio ao ligante; f) nivelamento da superfície com a ajuda da régua.

Figura 4.2 - Ensaio de determinação da baridade

Os materiais foram inicialmente submetidos à secagem em estufa ventilada  $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$  para não haver segregação das partículas.

O procedimento adoptado, relativamente à norma NP EN 1097-3:2002 (IPQ, 2002), difere no equipamento utilizado para a determinação da baridade do agregado reciclado. Foi utilizada uma garrafa de água de um litro cortada no topo devido às dimensões das partículas, com suporte de altura regulável. Em alternativa ao funil metálico utilizado na determinação da baridade do ligante e do agregado normalizado.

Assim foi possível a passagem de partículas mais grossas para o recipiente, a uma altura de 50 mm entre o topo da garrafa e o aro superior do recipiente metálico.

O material foi esquartejado em quatro partes iguais, antes da passagem para o funil e para a garrafa, de modo a ter-se uma redução do tamanho da amostra.

Os resultados médios das nove amostras de agregado reciclado, das três amostras de areia normalizada e três amostras de ligante encontram-se representados na tabela 4.1.

Na tabela I.1 do anexo, indicam-se os valores de baridade de cada amostra de agregados e ligante.

Tabela 4. 1 - Resultados médios de baridade dos agregados e ligantes

<i>Material</i>	<i>Resultados médios de baridade dos agregados e ligantes [kg/cm<sup>3</sup>]</i>
Agregado fino reciclado	1242,6
Agregado fino normalizado	1627
Cal aérea	294,8

### ***Ensaio de Granulometria***

O ensaio de análise granulométrica realiza-se sobre o agregado fino reciclado e agregado fino normalizado utilizados nas amassaduras.

O ensaio consiste em fazer passar a amostra de agregado através de 9 peneiros da série principal ASTM e um da série secundária (peneiro ½”), posicionados de cima para baixo por ordem decrescente da dimensão da abertura das malhas, progredindo geometricamente segundo a razão 2. Com esta análise obtêm-se a curva granulométrica do agregado, que corresponde à percentagem em peso que cada fracção possui em relação à massa total, a máxima dimensão do agregado (D), que corresponde á menor abertura da malha do peneiro da serie principal de peneiros ASTM, através do qual passa uma quantidade de agregado superior ou igual a 90%, a mínima dimensão do agregado (d), que corresponde à maior abertura da malha do peneiro da série principal através do qual passa uma quantidade de agregado inferior ou igual a 5% e o módulo de finura (MF), que corresponde à soma das percentagens totais retidas acumuladas em cada peneiro da série principal dividida por 100.

A soma dos resíduos nos peneiros deverá ser igual à massa inicial da amostra, com uma tolerância de 1%, devido a possíveis perdas de material durante o ensaio.

### ***Agregados finos normalizados***

A análise realizou-se com base nas regras estipuladas pela norma NP EN 933-1:2000 (IPQ, 2000). O procedimento e os equipamentos usados no ensaio de análise granulométrica do agregado fino normalizado (IPQ, 2000) serão descritos de seguida.

### **Equipamentos**

- Balança de precisão 0,1 g;
- Estufa ventilada;
- Pá;

- Peneiros ASTM com abertura da malha quadrada de 4,76mm (n.º4), 2,38mm (n.º8), 1,19mm (n.º16), 0,595mm (n.º30), 0,297mm (n.º50), 0,149mm (n.º100), 0,075mm (n.º200);
- Agitador mecânico de peneiros.

### **Procedimento**

- Secou-se a amostra na estufa ventilada a  $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$  até massa constante;
- Esquartelou-se o material em quatro partes idênticas para redução do tamanho da amostra;
- Pesou-se 1000g de agregado fino normalizado, em função da capacidade dos peneiros;
- Colocou-se a amostra de agregado no interior do peneiro superior do 1º agrupamento de peneiros, dispostos de modo que a abertura das malhas diminua de cima para baixo;
- Colocou-se a amostra de agregado no interior do peneiro superior do 2º agrupamento de peneiros, dispostos de modo que a abertura das malhas diminua de cima para baixo;
- Peneirou-se mecanicamente o agregado durante 10min;
- Após peneiração registou-se a massa retida em cada peneiro, incluindo o recipiente de fundo (refugo) e calculou-se as percentagens relativas à massa inicial.

### ***Agregados finos reciclados***

O procedimento e os equipamentos usados no ensaio de análise granulométrica do agregado fino reciclado serão descritos de seguida.

### **Equipamento**

- Balança de precisão 0,1 g;
- Estufa ventilada;
- Peneiros ASTM com abertura da malha quadrada de 19,1mm ( $\frac{3}{4}''$ ), 12,7mm ( $\frac{1}{2}''$ ), 9,51mm ( $\frac{3}{8}''$ ), 4,76mm (n.º4), 2,38mm (n.º8), 1,19mm (n.º16), 0,595mm (n.º30), 0,297mm (n.º50), 0,149mm (n.º100) e de 0,075mm (n.º200);
- Agitador mecânico de peneiros.

### **Procedimento**

O procedimento experimental é idêntico ao do agregado fino normalizado, com a diferença no ponto 3) e 6), uma vez que a quantidade de amostra pesada é 2000g, de modo a ter uma amostra maior e mais diversificada.

O tempo de peneiração, que corresponde ao ponto 6 foi de 15 minutos devido à composição grosseira do agregado fino reciclado.

Na figura 4.3 pode observar-se imagens do ensaio de determinação da análise granulométrica.



a) esquarteramento do agregado fino reciclado; b) série de peneiros ASTM; c) agitador mecânico e peneiros ASTM; d) pesagem de material; e) resultado do ensaio várias frações.

Figura 4.3 - Ensaio de determinação da análise granulométrica

As curvas granulométricas e as características dos dois agregados utilizados na preparação das argamassas encontram-se, respectivamente, na figura 4.4 e na tabela 4.2.

Os resultados obtidos nas três amostras ensaiadas de cada agregado encontram-se nas tabelas I.2 a I.5 e figuras I.1 a I.4 no anexo.

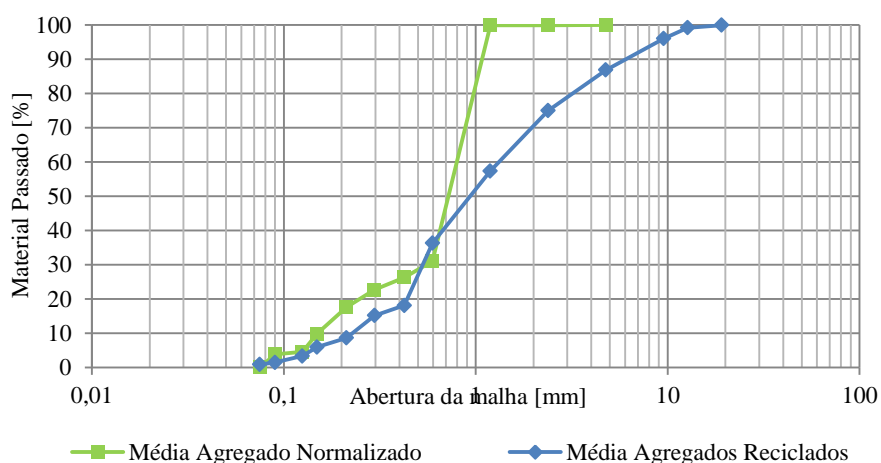


Figura 4.4 - Curva granulométrica do agregado fino reciclado e do agregado fino normalizado

Observa-se na figura 4.4, que a curva granulométrica do agregado fino reciclado tem uma maior diversidade de materiais quando comparado com o agregado normalizado.

Tabela 4.2 - Características físicas dos agregados

<i>Material</i>	<i>Módulo de finura</i>	<i>D [mm]</i>	<i>d [mm]</i>
Agregado fino reciclado	4.26	19.1	0.075
Agregado fino normalizado	3.36	2.38	0.075

#### 4.3.2. Ligante

Para a cal aérea hidratada em pó, realizou-se o ensaio de baridade, que é descrito no ponto 4.3.1.

#### 4.4. Preparação das amassaduras

Definiu-se um total de cinco argamassas a ensaiar, variando a quantidade e o tipo de agregado.

No que diz respeito ao traço adoptou-se, para todas as argamassas, um traço volumétrico 1:3 (ligante: agregado), sendo o agregado fino normalizado e fino reciclado utilizados em diferentes proporções.

Foram moldados 32 provetes, para caracterizar a argamassa endurecida, dos quais 5 provetes rectangulares constituídos por uma camada de argamassa de 30cmx20cmx1,5cm, para realização dos ensaios de aderência ao suporte (material cerâmico) e 27 provetes prismáticos de 16cmx4cmx4cm, com recurso a moldes metálicos, para realização de ensaios. Na tabela 4.3, são identificadas as proporções dos constituintes das cinco amassaduras.

Na tabela 4.3 observa-se a caracterização das proporções dos constituintes das amassadura ao traço 1:3.

Tabela 4.3 - Proporções dos constituintes das amassadura.

<i>Amassadura</i>	<i>Sigla<sup>1)</sup></i>	<i>Ligante</i>	<i>Agregado</i>	
		Cal aérea	Normalizado	Reciclado
1	0N100R	1	0	1
2	25N75R	1	3/4	9/4
3	50N50R	1	3/2	3/2
4	75N25R	1	9/4	3/4
5	100N0R	1	3	0

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Na preparação das argamassas, seguiu o procedimento da ficha de ensaio Fe 19 (UNL/FCT, 1996), foram realizadas 5 amassaduras. Na tabela 4.4 identifica-se a quantidade de agregados e ligantes utilizados na realização das diferentes amassaduras.

A preparação das argamassas em pasta pode observar na figura 4.5.

Tabela 4.4 - Caracterização da composição das argamassas

<i>Amassadura</i>	<i>Sigla<sup>1)</sup></i>	<i>Quantidade de Agregado</i>		<i>Quantidade de Ligante [g]</i>	<i>Quantidade de água [ml]</i>	<i>a/l</i>
		Agregado Normalizado [g]	Agregado Reciclado [g]			
1	0N100R	0	3917,2	309,9	1010	3,3
2	25N75R	1098,7	2516,4	309,8	860	2,8
3	50N50R	2564,2	1958,6	309,8	935	3,0
4	75N25R	3847,3	978,5	309,2	940	3,0
5	100N0R	5128,2	0	309,7	930	3,0

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

#### **Equipamento:**

- Misturador mecânico de argamassas;
- Cronómetro;
- Balança de precisão de 0,01g;
- Proveta graduada.

#### **Procedimento**

- Pesou-se cada constituinte da argamassa (agregados e ligante);
- Homogeneizou-se manualmente os constituintes secos e colocou-se na cuba;
- Mediu-se da quantidade de água necessária a adicionou-se à mistura, através de uma proveta graduada (começamos com 500ml);
- Ligou-se o misturador mecânico (com contagem de tempo de 45s), adicionando simultaneamente a quantidade de água previamente determinada no ensaio de espalhamento (factor *a/l*);
- Parou-se o aparelho para limpeza dos bordos da cuba durante um intervalo de 30s;
- Realizou-se uma nova amassadura mecânica, durante mais 60s.



a) pá utilizada no misturador mecânico; b) misturador mecânico; c) colocação da quantidade de água previamente determinada; d) cofragem dos provetes rectangulares de 30cm×20cm×1,5cm; e) descofragem dos provetes rectangulares de 30cm×20cm×1,5cm; f) provetes rectangulares de 30cm×20cm×1,5cm 24h após amassaduras.

Figura 4.5 - Preparação das argamassas em pasta

## 4.5. Ensaio às argamassas no estado fresco

### 4.5.1. Ensaio de consistência por espalhamento

Para chegar à consistência desejada das argamassas realizaram-se vários ensaios de consistência por espalhamento, com os seguintes equipamentos e procedimento de ensaio a seguir enunciados (IPQ, 1999).

#### Equipamento:

- Mesa de consistência;
- Molde tronco-cônico;
- Craveira analógica;
- Varão metálico de compactação, com 15mm de diâmetro;
- Régua metálica.

#### Procedimento:

- Verificou-se o estado de secagem e limpeza do equipamento;
- Colocou-se o molde no centro da mesa de consistência;



- Encheu-se o molde em duas camadas de altura sensivelmente iguais;
- Compactou-se com o varão (20 pancadas em cada camada), mantendo o molde fixo na mesa de consistência;
- Nivelou-se a superfície e retirou-se o molde com cuidado;
- Rodou-se a manivela, provocando 15 pancadas em 15s;
- Mediu-se com a craveira, segundo os quatro diâmetros gravados no tampo da mesa, do afastamento entre dois pontos de intersecção de cada um deles com o contorno da argamassa, após o espalhamento provocado pelas 15 pancadas;
- Calculou-se a média das quatro medições,  $d$ , arredondada à unidade.

O valor de espalhamento (Esp) arredondado à unidade é dado de acordo com a seguinte expressão (IPQ, 1999):

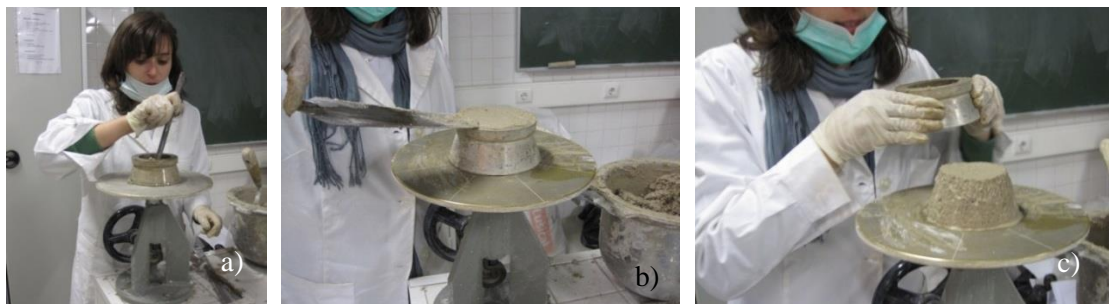
$$\text{Esp} = \frac{(d - 10)}{10} \times 100 \quad (4.5)$$

Sendo:

$d$  [cm] a média dos quatro valores medidos;

10 cm, o diâmetro interior da base do molde tronco-cônico.

Na figura 4.6 pode observar-se o ensaio de consistência por espalhamento das argamassas no seu estado fresco.



a) argamassa no molde em compactação; b) nivelamento da superfície; c) remoção do molde

Figura 4.6 - Ensaio de consistência por espalhamento das argamassas no seu estado fresco

Na tabela 4.5 apresentam-se os resultados obtidos nas quatro medições diametraais realizadas no ensaio de consistência por espalhamento às argamassas estudadas.



Na tabela I.6 do anexo apresentam-se os resultados obtidos nas quatro medições diametrais realizadas no ensaio de consistência por espalhamento às argamassas ensaiadas.

Tabela 4. 5 - Resultados do ensaio de consistência por espalhamento

<i>Amassadura</i>	<i>Sigla<sup>1)</sup></i>	<i>Água [ml]</i>	<i>Médio [cm]</i>	<i>Espalhamento [%]</i>
1	0N100R	1010	16,4	63,5
2	25N75R	860	16,9	69,5
3	50N50R	935	16,2	61,8
4	75N25R	940	17,4	73,8
5	100N0R	930	17,6	75,8

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

O enchimento dos moldes dos provetes realizou-se de acordo com a Fe 19 (UNL/FCT, 1996). A moldagem dos provetes decorreu durante o dia 19 de Março de 2012.

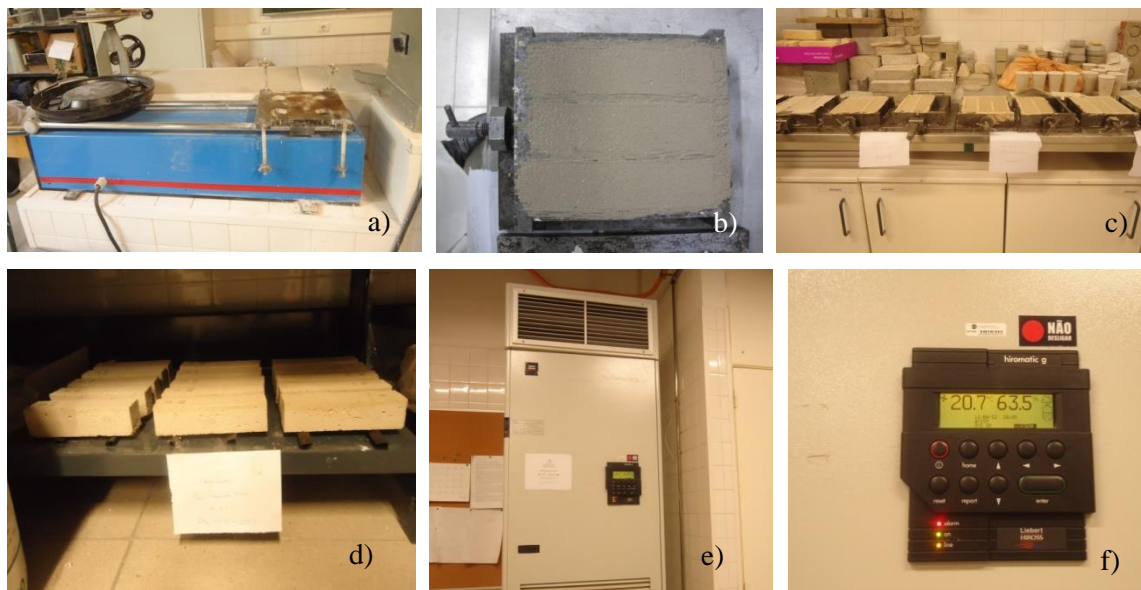
De seguida é descrito o procedimento e os equipamentos necessários no enchimento dos moldes. Na figura 4.7 pode observar-se o enchimento dos moldes dos provetes prismáticos.

#### **Equipamentos:**

- Compactador mecânico;
- Moldes prismáticos de 4cmx4cmx16cm.

#### **Procedimento:**

- Colocou-se o molde bem fixo na mesa do compactador mecânico;
- Encheu-se o molde em duas camadas de alturas sensivelmente iguais;
- Compactou-se cada camada com vinte pancadas;
- Removeu-se o excesso de argamassa.



a) compactador mecânico; b) preenchimento dos moldes dos provetes de argamassa em estado fresco; c) moldes preenchidos; d) Provetes prismáticos de 16cmx4cmx4cm desmoldados em ambiente de cura; e) sala de ambiente condicionado; f) humidade relativa da sala de ambiente condicionada.

Figura 4.7 - Enchimento dos moldes dos provetes prismáticos

Após a moldagem dos provetes, os mesmos permaneceram no laboratório durante 7 dias.

Depois de sete dias, os provetes foram desmoldados, e colocados na sala de cura, em condições de temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e humidade relativa de  $60 \pm 5\%$ . Os provetes desmoldados foram colocados numa estante e cada um deles sobre suporte, para facilitar o contacto da face inferior dos provetes com o ambiente de cura.

#### **4.6. Ensaio de caracterização física e mecânica das argamassas endurecidas**

Os ensaios de caracterização, física e mecânica, realizados sobre as argamassas no estado endurecido foram:

- Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico;
- Ensaio de resistência à tração por flexão;
- Ensaio de aderência ao suporte;
- Ensaio de capilaridade;
- Ensaio de secagem;
- Ensaio da porosidade aberta;
- Ensaio de porosimetria de mercúrio.

A figura 4.8 apresenta o esquema que traduz os ensaios realizados nos provetes, a forma dos respectivos provetes e a sua ordem de execução.

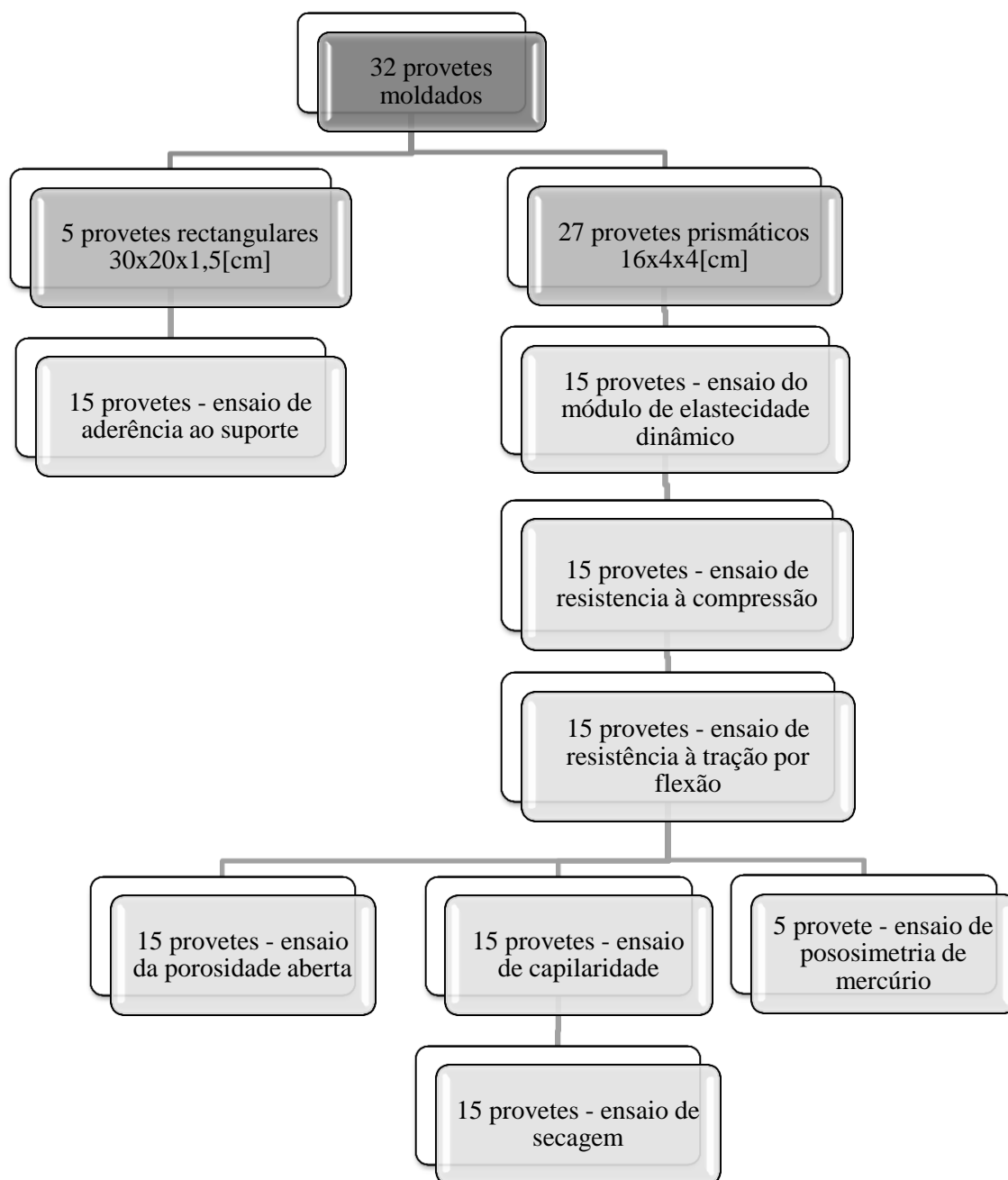


Figura 4. 8 - Sequência esquemática dos ensaios realizados nos provetes

#### **4.6.1. Módulo de elasticidade dinâmico**

À capacidade que os corpos têm de se deformar quando sujeitos a um esforço, recuperando as dimensões iniciais após terminada a acção, sem, no entanto, romper dá-se o nome de elasticidade (Braga, 2010).

O módulo de elasticidade dinâmico das argamassas permite perceber a sua susceptibilidade à fendilhação (compatibilidade física com o suporte), ao nível da sua deformabilidade (Barra, 2011) e de certa forma, a homogeneidade do material. Valores de módulo de elasticidade dinâmico elevados correspondem a materiais com maior rigidez, e valores baixos correspondem a materiais com elevada deformabilidade (Barreto, 2010). Este ensaio consiste na medição da frequência de ressonância longitudinal do provete de ensaio, através de um aparelho de medição de frequências fundamentais, este aparelho mede a frequência mais baixa para a qual se obtém uma amplitude máxima. O ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi realizado com base na ficha de ensaio Fe 08 (UNL/FCT, 1996).

Neste ensaio foram utilizados provetes inteiros, antes de serem ensaiados à tracção por flexão e à compressão. De seguida indicam-se os equipamentos e procedimento de ensaio utilizados na determinação do módulo de elasticidade dos provetes de ensaio (UNL/FCT, 1996).

##### **Equipamento:**

- Estufa ventilada;
- Balança com precisão 0,1g;
- Equipamento adequado para emissão de vibrações e registo da frequência de ressonância longitudinal correspondente.

##### **Procedimento:**

- Secou-se os provetes em estufa ventilada a  $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$  até obter massa constante;
- Colocou-se cada provete no equipamento, aplicando numa extremidade uma fonte emissora e, na outra, a unidade de recepção;
- Ligou-se o oscilador de frequência variável que alimenta o vibrador, com registo das amplitudes das vibrações, correspondendo as condições de ressonância às amplitudes máximas.

Na figura 4.9 observa-se o ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico.



a) pesagem dos provete secos; b) provetes ensaiados e equipamento para a determinação do Edin; c) equipamento informático de processamento de dados

Figura 4.9 - Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico é automaticamente calculado pelo programa informático que processa os dados recebidos do equipamento, através da expressão (UNL/FCT, 1996):

$$E_{din.} = (2 \times L \times f_0)^2 \times \rho / g \times 10^{-6} \text{ [MPa]} \quad (4.6)$$

Sendo:

$L$ , o comprimento do provete [m];

$f_0$ , a frequência de ressonância longitudinal [Hz] ;

$\rho$ , a massa volúmica [ $\text{N/m}^3$ ];

$g$ , a aceleração da gravidade [ $9,81 \text{ m/s}^2$ ].

Foram efectuadas quatro determinações para cada um dos provetes, colocando o provete em diferentes posições, as quais não devem diferir mais do que 5%. A frequência longitudinal final de cada um dos provetes é dada pela média das quatro determinações.

Na tabela 4.6 apresentam-se os resultados médios obtidos no ensaio de determinação do módulo de elasticidade aos 90 dias.

Nas tabelas I.7 a I.11 do anexo apresentam-se os resultados individuais obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico para as argamassas ensaiadas.

Tabela 4.6 - Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico

<i>Argamassa</i>	<i>Sigla<sup>1)</sup></i>	<i>Edin [MPa]</i>	<i>DP [MPa]</i>
1	0N100R	1308,7	75,6
2	50N75R	1493,1	67,7
3	50N50R	1808,7	59,4
4	75N25R	2663	124,1
5	100N0R	2587,4	89,0

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

#### **4.6.2. Resistências mecânicas à tracção por flexão e à compressão**

As resistências mecânicas das argamassas são parâmetros importantes para a sua caracterização pois através deles podemos conhecer a sua capacidade resistente (Barreto,2010).

Para esta caracterização, em primeiro lugar é efectuado o ensaio de resistência à tracção por flexão e, com as metades dos provetes resultantes, realiza-se o ensaio de resistência à compressão, do qual resultam apenas as duas extremidades de cada “meio provete” (as quais são depois usadas em ensaios de determinação da massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta). A metodologia de ensaio de resistências mecânicas à tracção por flexão e à compressão realizou-se de acordo com a norma EN 1015-11:1999 (CEN, 1999) e com a ficha de ensaio Fe 27 (UNL/FCT, 1999). De seguida descreve-se os equipamentos e procedimento de ensaio, e observa-se a realização do ensaio.

##### **Equipamentos:**

- Estufa ventilada;
- Máquina universal de tracção (Zwick);
- Suporte para ensaio de flexão;
- Suporte para ensaio de compressão.

##### **Procedimento** (determinação da resistência à tracção por flexão):

- Após terem sido submetidos às condições de cura, colocou-se os provetes a secar em estufa ventilada a  $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$ , até atingirem massa constante;
- Colocou-se dos provetes prismáticos sobre o suporte para o ensaio de flexão, cujos pontos de apoio devem estar afastados de 10mm e com as faces de moldagem em contacto com as superfícies de carregamento;
- Aplicou-se a carga a meio vão, com uma velocidade de 5,1mm/min ( $50\pm10\text{N/s}$ ), até à rotura e registou-se o valor da carga última ao qual resistem os provetes -  $F_f$ .

##### **Procedimento** (determinação da resistência à compressão):

- Colocou-se os meios provetes resultantes do ensaio de flexão no suporte para ensaio de compressão (com uma área de contacto de  $1600\text{ mm}^2$ ) e com as faces de moldagem em contacto com as superfícies de carregamento;
- Aplicou-se a carga com uma velocidade de 5,2 mm/min ( $100\pm10\text{N/s}$ ), até à rotura e registou-se o valor da carga última à qual os provetes resistem -  $F_c$ .

Na figura 4.10 pode observar-se imagens do ensaio da determinação da resistência mecânica.



a) suporte para ensaio de flexão/compressão; b) ensaio de flexão; c) ensaio de compressão realizado a meio provete; d) provetes resultantes do ensaio de compressão

Figura 4.10 - Ensaio da determinação da resistência mecânica

Durante o ensaio de resistência à tracção por flexão e resistência à compressão foram ensaiados 3 provetes de cada argamassa. Os resultados são expressos em MPa e de acordo com a seguinte expressão (CEN, 1999; UNL/FCT, 1999):

Resistência à flexão:

$$R_f = \frac{(1,5 \times F_f \times l)}{b^3} \quad (4.7)$$

Resistência à compressão:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (4.8)$$

Sendo:

b, o lado da secção quadrada do prisma (neste caso b=40 mm);

l, a distância entre apoios (neste caso l=100 mm);

A, a área de contacto (neste caso A=40×40=1600 mm<sup>2</sup>);

F<sub>f</sub>, F<sub>c</sub> [N] são forças de rotura para a flexão e compressão.

Na tabela 4.7 encontram-se os resultados médios obtidos nos ensaios de determinação da resistência à tracção por flexão e resistência à compressão dos provetes ensaiados.

Nas tabelas I.12 e I.13 do anexo, indicam-se as resistências à tracção por flexão e resistências à compressão obtidas para cada tipo de provete de argamassa ensaiado.

Tabela 4.7 - Resultados médios de resistência mecânica à tracção por flexão e compressão

<i>Argamassa</i>	<i>Sigla<sup>1)</sup></i>	<i>Rt [MPa]</i>	<i>DP [MPa]</i>	<i>Rc [MPa]</i>	<i>DP [MPa]</i>
1	0N100R	0,55	0,10	1,74	0,33
2	50N75R	0,49	0,07	1,71	0,05
3	50N50R	0,55	0,07	1,63	0,06
4	75N25R	0,52	0,09	1,54	0,05
5	100N0R	0,42	0,02	0,92	0,24

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

#### **4.6.3. Aderência ao suporte**

A aderência é uma propriedade bastante importante para o cumprimento das funções de impermeabilização do revestimento e é condicionante para a durabilidade das argamassas (Braga, 2010). Além disso, influencia bastante a resistência à fendilhação, na medida em que condiciona a distribuição de tensões - geradas por movimentos diferenciais em relação ao suporte - na argamassa (Veiga, 1998). Um material muito rígido e com elevada aderência ao suporte (ex.: argamassa fortemente doseada em cimento) será muito susceptível a movimentos do suporte, em resultado dos quais pode apresentar vários níveis de fendilhação (Barra, 2011).

A metodologia de ensaio realizou-se segundo a norma EN 1015-12:1999 (CEN, 1999) e pela ficha de ensaio Fe 21 (UNL/FCT, 1996). Na figura 4.11 pode observar-se imagens do ensaio de aderência ao suporte.

#### **Equipamentos:**

- Tijolos (300cmx200cmx40cm);
- Estufa ventilada;
- Borrifador;
- Régua graduada;
- Moldura de madeira;
- Pastilhas quadradas (50mmx50mm) encomendadas propositadamente para ensaio;
- Rebarbadora;
- Cola de alta resistência (resina epóxida);
- Acessório de arrancamento (dinamómetro).



**Procedimento:**

- Secou-se os provetes em estufa ventilada a  $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$  até obter massa constante;
- Colocou-se uma moldura de madeira nas faces laterais menores do tijolo e borrifou-se o suporte ao longo da sua maior superfície;
- Colocou-se a argamassa em pasta em toda a extensão da superfície borrifada, até a superfície ficar totalmente lisa;
- Após a cura do provete, procedeu-se às marcações dos locais de entalhe. Os entalhes realizaram-se com o auxílio de uma rebarbadora, de modo a descer sobre o provete, até atingir a superfície do tijolo. Estes entalhes são quadrangulares e possuem 2cm de espessura;
- Colou-se as pastilhas metálicas sobre as zonas delimitadas pelas incisões e deixou-se secar durante um período mínimo de 48h;
- Colocou-se o dinamómetro sobre cada uma das pastilhas em análise. Após verificação do valor zero no manómetro, rodou-se o manípulo do dinamómetro impondo uma força constante até rotura entre o plano de contacto da argamassa e o suporte;
- Registou-se o valor da força máxima exercida e avaliou-se o tipo de rotura obtida, tendo em conta os cenários possíveis.



a) marcação dos locais de entalhe; b) realização dos entalhes; c e d) colagem das pastilhas nos respectivos locais de entalhe; e) secagem da cola durante 24 h; f) aplicação da força de arrancamento; g) arrancamento das pastilhas, h) arrancamento coesivo; i) resultado final do ensaio.

Figura 4.11 - Ensaio de aderência ao suporte

Os resultados deste ensaio vêm expressos em MPa, sendo que a tensão de aderência associada a cada pastilha ( $\sigma_a$ ) é dada pela seguinte expressão (CEN, 1999; UNL/FCT, 1996):

$$\sigma_a = \frac{F}{S} [MPa] \quad (4.9)$$

Sendo:

F, a força de rotura expressa em N;

S, a área da pastilha em mm<sup>2</sup> (S=1963mm<sup>2</sup>, no caso de uma pastilha circular).

Face à baixa aderência das pastilhas circulares foram utilizadas pastilhas quadradas. Neste sentido, como o dinamómetro está programado para a utilização de pastilhas circulares foi realizada uma conversão dos resultados obtidos através do seguinte factor de conversão.

$$\sigma'_a = \frac{F}{S} \times \frac{S}{S_i} [MPa] \quad (4.10)$$

Sendo:

F, a força de rotura expressa em N;

S, a área da pastilha circular em mm<sup>2</sup> (S=1963mm<sup>2</sup>);

S<sub>i</sub>, a área da pastilha quadrada em mm (S<sub>i</sub>=50 x 50=2500 mm<sup>2</sup>);

$\sigma'_a$ , a tensão de aderência associada a pastilhas quadradas.

No decorrer do ensaio de aderência, durante a marcação dos locais de entalhe, deu-se a rotura antecipada do local de entalhe na fase de corte, do provete de argamassa constituída por 100% agregado reciclado (0N100R), devendo este ponto ser desprezado.

Na tabela 4.8 encontra-se os resultados médios obtidos das três determinações efectuadas em cada provete tipo das cinco argamassas. Na tabela I.14 do anexo, apresentam-se os resultados individuais do ensaio de aderência ao suporte das argamassas ensaiadas.

Tabela 4.8 - Resultados médios de aderência ao suporte

<i>Argamassa</i>	<i>Sigla <sup>1)</sup></i>	<i><math>\sigma_a^{med}</math> [MPa]</i>	<i>DP[MPa]</i>
1	0N100R	-	-
2	50N75R	0,09	0,01
3	50N50R	0,08	0,04
4	75N25R	0,09	0,02
5	100N0R	0,1	0,01

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Na figura 4.12 e tabela 4.9 pode observar-se as diferentes tipologias de rotura que se pode obter no ensaio de aderência.

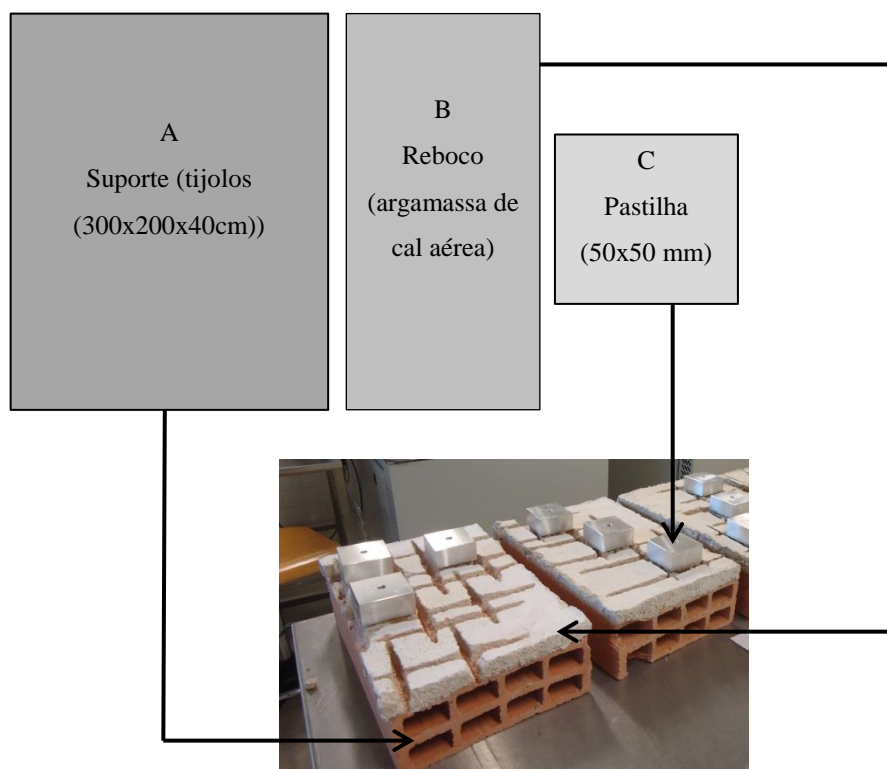


Figura 4.12 - Tipologia de rotura no ensaio de aderência

Tabela 4.9 - Tipologia de rotura

<i>Tipologia de rotura</i>	
Coesiva	Rotura a meio do plano B Arrancamento da pastilha e uma parte do reboco Adesão é mais forte que a coesão
Adesiva	Rotura entre o plano de contacto de A e B Arrancamento da pastilha e todo o reboco
Mista	Rotura a meio do plano A Arrancamento da pastilha, reboco e uma parte do suporte (tijolo)

#### 4.6.4. Absorção de água por capilaridade

Uma análise da curva de absorção de água por ascensão capilar permite obter dois parâmetros: o valor assintótico, VA, valor máximo da quantidade de água absorvida pela argamassa; o coeficiente de capilaridade, CC, obtido através do declive da recta do troço inicial da curva de absorção de água, que traduz a maior ou menor velocidade de absorção de água em cada argamassa.

A absorção de água por capilaridade é medida por a percentagem de poros (porosidade). Quanto maior foi a dimensão dos poros de um material (porometria), menor será a sua absorção por capilaridade.

O ensaio realizou-se de acordo com as regras estipuladas pela ficha de ensaio Fe 06 (UNL/FCT, 1999). Segue-se a descrição dos equipamentos e respectivo procedimento de ensaio (UNL/FCT, 1999).

#### **Equipamentos:**

- Estufa ventilada;
- Balança de precisão de 0,01g;
- Caixa de plástico com tampa;
- Tabuleiro de material rígido e não absorvente;
- Tijolo (300cmx200cmx40cm);
- Papel absorvente;
- Esguicho com água destilada;
- Cronómetro;
- Termo higrómetro.

#### **Procedimento:**

- Após terem sido submetidos às condições de cura, colocou-se os provetes a secar em estufa ventilada a  $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$ , até massa constante;
- Pesou-se os provetes secos, obtendo-se a massa  $M_0$ ;
- Colocou-se o tabuleiro dentro de uma caixa de plástico com tampa, dentro da qual se verteu água com altura suficiente para que se criem condições de saturação (aproximadamente 10cm de altura); o tabuleiro é posto sobre um tijolo, impedindo a entrada de água no seu interior e garantindo a sua horizontalidade;
- Colocou-se uma folha de papel absorvente no fundo do tabuleiro;
- Com o esguicho, criou-se uma lâmina de água no interior do tabuleiro com altura suficiente para que, depois da colocação dos provetes no seu interior, esta se mantenha a uma altura de 2mm;
- Colocou-se os provetes com a face plana menor (4×4) assente no tabuleiro;
- Fechou-se a caixa com a tampa, de modo a manter o nível da água dentro do recipiente até ao final do ensaio;
- Passados 5min, retirou-se os provetes, limpou-se a superfície imersa com papel absorvente, pesou-se e colocou-se novamente dentro da caixa de plástico, obtendo-se a massa  $M_i$ ;

- Repetição do processo após 15, 30, 60, 180, 360 min e a fim de cada 24h, até obter massa constante.

Na figura 4.13 apresenta-se imagem do ensaio de absorção de água por capilaridade.



a) nivelamento da caixa para ensaio; b) colocação de água na caixa para condição de saturação; c) vista do interior da caixa; d) pesagem dos provetes; e) balança; f) condições de humidade da sala condicionada na altura de realização do ensaio

Figura 4.13 - Ensaio de absorção de água por capilaridade

O valor da quantidade de água absorvida por cada determinação de massa, até ao instante  $t$  ( $M_t$ ) é dado pela expressão seguinte (UNL/FCT, 1999):

$$M_T = \frac{M_0 \times M_i}{S} \text{ [Kg/m}^3\text{]} \quad (4.11)$$

Sendo:

$M_i$ , a massa do provete no instante  $t=i$  em g;

$M_0$ , a massa do provete seco em g;

$S$ , a área da face em contacto com a água (neste caso,  $S=0,04 \times 0,04=0,0016\text{m}^2$ ).

Com os valores obtidos ( $M_t$ ), traça-se um gráfico que corresponde à absorção de água por capilaridade de cada provete ao longo do tempo, com abcissas em  $\sqrt{t}$  ( $t$  em horas) e ordenadas em  $\text{kg/m}^2$ . O coeficiente de absorção de água por capilaridade de cada provete, expresso em  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ , define-se como o coeficiente angular do troço inicial do gráfico (segmento de recta).

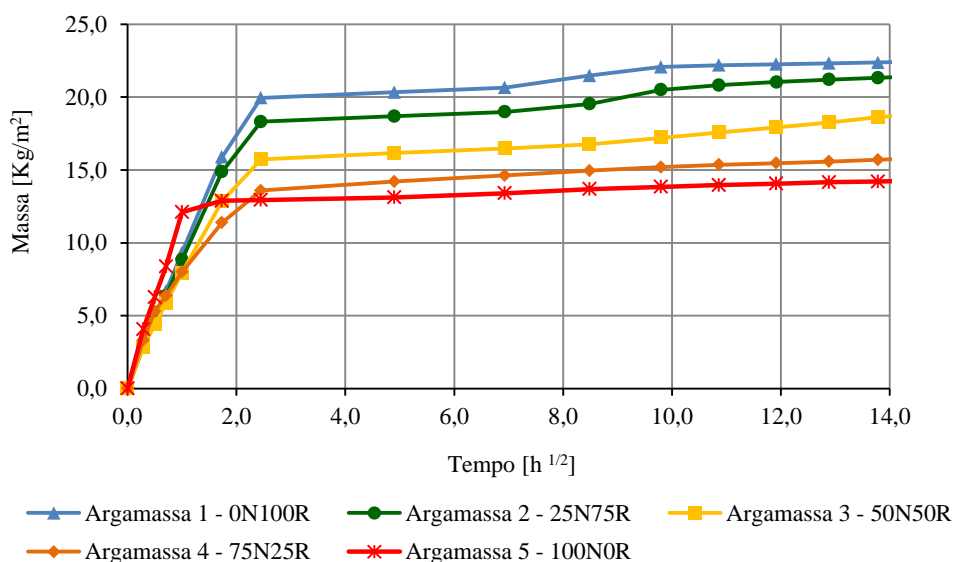
O valor assintótico da curva de absorção de água, é determinado quando é atingida a diferença entre dois valores sucessivos de massa determinados,  $m_i$  e  $(m_i-1)$  for inferior a 1%, expresso em  $\text{kg/m}^2$ . O coeficiente de absorção de água por capilaridade representa a velocidade inicial de absorção de água do provete e o valor assintótico representa a máxima absorção capilar a que o provete pode estar sujeito (Barra, 2011). Na tabela 4.10 apresenta-se os valores médios de absorção de água por capilaridade e os valores médios do valor assintótico calculados.

Tabela 4.10 - Resultados médios do coeficiente de absorção de água e valor assintótico

Argamassa	Sigla <sup>1)</sup>	CC [ $\text{Kg/m}^2\cdot\text{h}^{1/2}$ ]	DP [ $\text{Kg/m}^2\cdot\text{h}^{1/2}$ ]	VA [ $\text{Kg/m}^2$ ]	DP [ $\text{Kg/m}^2$ ]
1	0N100R	9,2	0,09	22,5	1,93
2	50N75R	8,6	0,08	21,4	1,36
3	50N50R	7,4	0,28	18,9	1,13
4	75N25R	10	3,94	15,8	0,58
5	100N0R	12,1	0,63	14,3	0,56

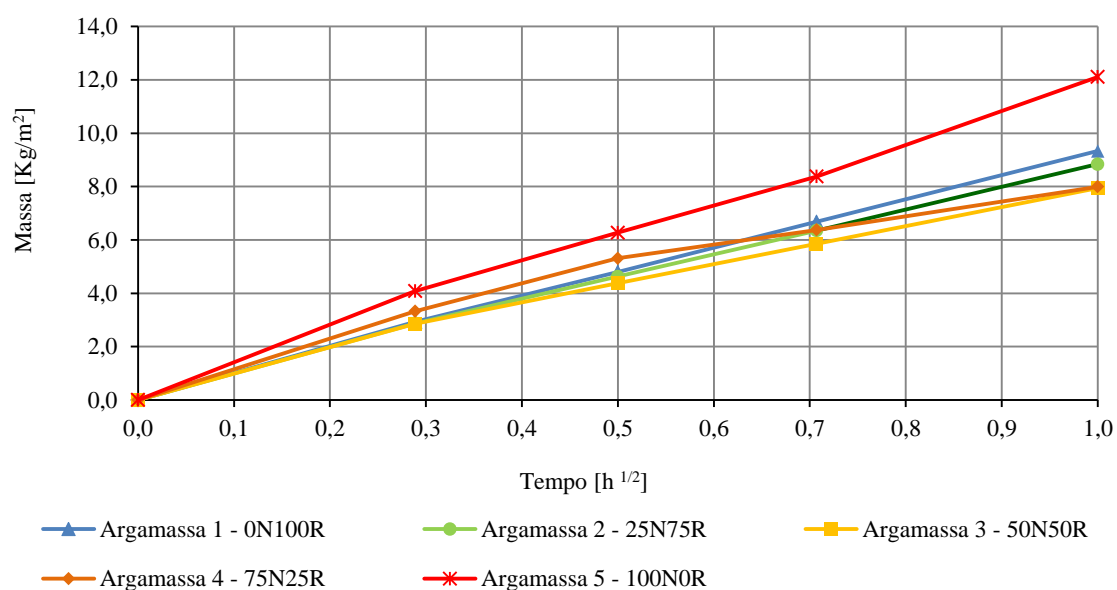
<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Na figura 4.14, observa-se os resultados médios de absorção de água por capilaridade, na figura 4.15, observa-se os resultados médios de absorção de água por capilaridade na 1ª hora de ensaio.



Amassadura	Sigla <sup>1)</sup>	Ligante	Agregado	
		Cal aérea	Normalizado	Reciclado
1	0N100R	1	0	3
2	25N75R	1	3/4	9/4
3	50N50R	1	3/2	3/2
4	75N25R	1	9/4	3/4
5	100N0R	1	3	0

Figura 4.14 - Resultados médios de absorção de água por capilaridade



Amassadura	Sigla <sup>1)</sup>	Ligante	Agregado	
		Cal aérea	Normalizado	Reciclado
1	0N100R	1	0	3
2	25N75R	1	3/4	9/4
3	50N50R	1	3/2	3/2
4	75N25R	1	9/4	3/4
5	100N0R	1	3	0

Figura 4.15 - Resultados médios de absorção de água por capilaridade na 1ª hora de ensaio

Nas tabelas I.15, I.16 e I.17 do anexo apresentam-se registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade, os resultados dos coeficientes de absorção de água por capilaridade e dos valores assintótico obtidos para cada provete de argamassa ensaiada.

#### 4.6.5. Secagem

Um dos aspectos importantes na avaliação do comportamento das argamassas é a secagem, pois é um indicador da durabilidade do suporte. O resultado deste ensaio é um parâmetro importante para a avaliação do comportamento das argamassas, nomeadamente, a sua capacidade de evaporação de água (podendo esta ter origem na capilaridade, infiltração ou condensação). Este parâmetro tem também influência no comportamento térmico das paredes, pois quanto mais húmida esta estiver, maior será a sua condutibilidade térmica (Barreto, 2010).

A secagem de uma argamassa está relacionada com os seus valores de porosidade aberta e com condições de temperatura e ventilação ambiente (Pereira, 2008).

Terminado o ensaio de absorção de água por capilaridade (com os meios provetes completamente saturados em água absorvida) deu-se início ao ensaio de secagem, com base na especificação da ficha de ensaio Fe 07 (UNL/FCT, 1996).

O ensaio decorreu em cima de uma bancada perfeitamente impermeável e lisa na sala da cura. Segue-se a descrição dos equipamentos e respectivo procedimento de ensaio.

**Equipamentos:**

- Tabuleiro de material não absorvente;
- Estufa ventilada;
- Balança com precisão de 0,001g;
- Cronómetro.
- Câmara condicionada.

**Procedimento:**

- Pesou-se os provetes saturados, imediatamente após a conclusão do ensaio de absorção de água por capilaridade;
- Colocou-se os provetes no tabuleiro de material não absorvente para promover a evaporação também pela face inferior;
- Pesou-se cada provete,  $M_i$ , após 15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300, 360 min e de 24 em 24h, até atingir massa constante, que corresponde a uma variação entre duas pesagens intervaladas de 24 horas menor ou igual a 0,01% da massa do provete.

Os resultados deste ensaio são obtidos através das medições diárias da massa dos provetes, com as quais se procede à elaboração de curvas de evaporação, ou curvas de secagem, que expressam a evolução do teor de água dos provetes ( $Q_i$ ) ao longo do tempo, em horas.

Os resultados são dados através da seguinte expressão:

$$Q_i = \frac{M_i - M_0}{M_0} \times 100 \text{ [%]} \quad (4.12)$$

Sendo:

$M_i$ , a massa do provete no instante  $t_i$  [g];

$M_0$ , a massa do provete seco [g].

A caracterização da rapidez de secagem das argamassas, faz-se através da determinação do índice de secagem (IS), que é dado pela seguinte expressão:



$$IS = \frac{\int_{10}^{Tf} f(Qi) \times dt}{Q_{m\acute{a}x} \times t_f} \quad (4.13)$$

Sendo:

$f(Qi)$ , a quantidade de água no interior do provete [%] em função do tempo, relativamente à massa seca;

$Q_{m\acute{a}x}$ , a quantidade de água inicial [%], relativamente à massa seca;

$t_f$ , o tempo final do ensaio [h].

O cálculo do integral foi efectuado através da seguinte expressão:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=ns} (t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2}}{Q_{m\acute{a}x} \times t_f} \quad (4.14)$$

Sendo:

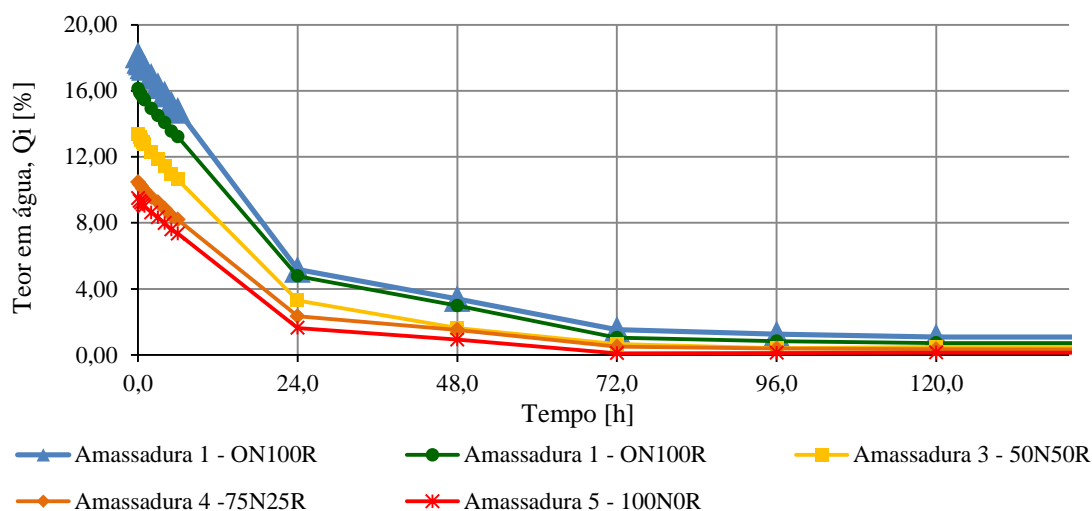
$Q_i$ , a quantidade de água no interior do provete no instante  $i$  [%], relativamente à massa seca;

$Q_{m\acute{a}x}$ , a quantidade de água inicial [%], relativamente à massa seca;  $t_f$  o tempo final de ensaio [h];

$t_i$ , o tempo de ensaio  $i$  [h];

$ns$ , o número de pesagens de controlo efectuadas.

Na figura 4.16 apresentam-se os resultados médios do ensaio de secagem para as argamassas estudadas.



Amassadura	Sigla <sup>1)</sup>	Ligante			Agregado	
		Cal aérea	Normalizado		Reciclado	
1	0N100R	1	0		1	
2	25N75R	1	1/4		3/4	
3	50N50R	1	1/2		1/2	
4	75N25R	1	3/4		1/4	
5	100N0R	1	1		0	

Figura 4.16 - Resultados médios do ensaio de secagem

Uma análise da curva de secagem com o tempo em abcissas permite obter dois parâmetros: o índice de secagem, *IS*, valor que traduz a evolução da secagem global; a taxa de secagem, *TS*, obtida através do declive da recta do troço inicial da curva de secagem, que traduz a maior ou menor velocidade de secagem em cada argamassa.

Na tabela 4.11 apresentam-se os resultados médios do índice de secagem.

Nas tabelas I.18 e I.23 apresentam-se os registos das massas de cada provete de argamassa durante o ensaio de secagem.

Tabela 4.11 - Resultados médios do índice de secagem

<i>Argamassa</i>	<i>Sigla</i> <sup>1)</sup>	<i>IS</i>	<i>DP</i>	<i>TS [kg/m<sup>2</sup>.h]</i>	<i>DP [kg/m<sup>2</sup>.h]</i>
1	0N100R	0,013	0,018	1,302	0,009
2	50N75R	0,011	0,016	0,992	0,119
3	50N50R	0,008	0,012	0,888	0,132
4	75N25R	0,006	0,009	0,568	0,220
5	100N0R	0,005	0,008	0,711	0,031

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

É de notar que este ensaio foi realizado sem colocação de película. Os resultados não podem ser comparados directamente com os de outros autores. No entanto valido os resultados deste ensaio no presente trabalho.

#### **4.6.6. Massa volúmica real, massa volúmica aparente, porosidade aberta.**

A massa volúmica real, aparente e a porosidade aberta das argamassas foram determinadas de acordo com as regras estipuladas pela ficha de ensaio Fe 01 e Fe 02 (UNL/FCT, 1996).

Os equipamentos e procedimentos de ensaio, foram comuns em ambos os ensaios, tendo apenas variado as expressões segundo as quais se calcularam os resultados.

Para este ensaio foram utilizadas as extremidades resultantes dos meios provetes resultantes do ensaio de resistência à compressão. Na figura 4.17 pode observar-se o ensaio de determinação da massa volúmica.

#### **Equipamentos**

- Estufa ventilada;
- Balança com precisão 0,001g;
- Exsiccador;
- Bomba de vácuo ligada ao exsiccador;

- Funil de vidro;
- Mangueiras de plástico.

**Procedimento:**

- Após terem sido submetidos às condições de cura, colocou-se os provetes a secar em estufa ventilada a  $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$ , até atingirem massa constante;
- Limpou-se os provetes, de modo a evitar diferenças das massas pesadas devido a desagregação do material;
- Pesou-se os provetes secos de modo a obter-se a massa  $M_0$ ;
- Colocou-se os provetes no interior do exsiccador fechado, diminuiu-se gradualmente a pressão no interior do exsiccador até aos 2667Pa (20mm de mercúrio) através de uma bomba de vácuo; os provetes são mantidos a esta pressão durante 24h;
- Ao fim de 24h, colocou-se a água no funil, a água entra dentro do exsiccador, lentamente e a uma temperatura de 15 a  $20^{\circ}\text{C}$ , até imersão total dos provetes, durante cerca de 15min; os provetes são mantidos em imersão total e sujeitos às condições de pressão anteriormente definidas (2667 Pa) durante 24h.



a) equipamentos utilizados; b) bomba de vácuo; c) base onde provetes são ensaiados; d) provetes em imersão total; e) pesagem hidrostática; f) pesagem dos provetes saturados.

Figura 4. 17 - Ensaio de determinação da massa volúmica

Os resultados são obtidos de acordo com as seguintes expressões (UNL/FCT, 1996):

Massa volúmica real (MVR):

$$MVR = \frac{M0}{M0 - M1} \times 10^3 \text{ [Kg/m}^3\text{]} \quad (4.16)$$

Massa volúmica aparente (MVA):

$$MVA = \frac{M0}{M2 - M1} \times 10^3 \text{ [Kg/m}^3\text{]} \quad (4.17)$$

Porosidade Aberta (PA):

$$PA = \frac{M2 - M0}{M2 - M1} \times 100 \text{ [%]} \quad (4.18)$$

Sendo:

M0, a massa dos provetes secos em g;

M1, a massa dos provetes correspondente à pesagem hidrostática em g;

M2, a massa dos provetes saturados em g.

Na tabela 4.12 apresenta-se os valores médios obtidos de massa volúmica real e aparente e porosidade aberta.

Nas tabelas I.24, I.25 e I.26 indicam-se os valores da massa volúmica real (MVR) massa volúmica aparente (MVA) e porosidade aberta (PA) aos 90 dias obtidos para cada provete de argamassa ensaiada.

Tabela 4.12 - Valores médios de massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta

<i>Argamassa</i>	<i>Sigla <sup>1)</sup></i>	<i>MVR [kg/m<sup>3</sup>]</i>	<i>DP [kg/m<sup>3</sup>]</i>	<i>MVA [kg/m<sup>3</sup>]</i>	<i>DP [kg/m<sup>3</sup>]</i>	<i>PA [%]</i>	<i>DP [%]</i>
1	0N100R	2418,4	8,3	1719,6	13,8	28,9	0,3
2	50N75R	2378,3	1,7	1772,7	13,8	25,5	0,5
3	50N50R	2329,0	2,1	1834,2	9,2	21,2	0,3
4	75N25R	2181,8	171,6	1935,1	133,5	10,6	13,8
5	100N0R	2279,9	1,0	1894,0	10,5	16,9	0,5

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Tendo em conta os resultados obtidos verifica-se que as argamassas com agregados finos normalizados apresentam massas volúmicas superiores às argamassas com agregados finos reciclados. Argamassas com agregados finos reciclados são mais porosos logo apresentam massas volúmicas menores.

#### 4.6.7. Porosimetria de mercúrio

Para uma melhor compreensão da estrutura porosa das argamassas recorreu-se à análise de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP), a provetes de cada argamassa.

A porosimetria de mercúrio baseia-se no princípio físico que determina que a pressão necessária para provocar a intrusão de um líquido não molhante num capilar de secção circular é inversamente proporcional ao diâmetro do capilar e directamente proporcional à tensão superficial do líquido (referente ao interface líquido-gás) e ao ângulo de contacto do líquido (sendo que a superfície sólida é a que delimita o capilar) (Rato,2006). O mercúrio é o líquido de intrusão mais frequentemente utilizado porque constitui um líquido que é não molhante em relação à maior parte dos materiais sólidos.

A distribuição do volume de poros abertos através do porosímetro de mercúrio, determina-se através do enchimento dos poros da amostra com mercúrio sob pressão. De seguida descreve-se os equipamentos e procedimento do ensaio.

##### Equipamentos

- Estufa ventilada;
- Balança com precisão 0,001g;
- Penetrâmetro;
- Porosímetro de mercúrio.

##### Procedimento:

- Limpou-se os provetes de dimensões reduzidas (figura 4.18a);
- Colocou-se os provetes em estufa ventilada a  $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$ , até atingirem massa constante;
- Pesou-se os provetes a ensaiar;
- Colocou-se o provete na cápsula de um penetrâmetro;
- Reduziu-se a pressão no penetrâmetro;
- Intrusão da quantidade de mercúrio necessária para o preenchimento da cápsula e da haste do penetrâmetro, circundando o provete;
- Aumentou-se gradualmente a pressão de modo a provocar a intrusão de mercúrio na estrutura porosa do provete, geralmente por patamares pré-definidos. Inicialmente até atingir uma pressão máxima ligeiramente superior à pressão atmosférica, de seguida atinge uma pressão máxima definida por o operador;
- Após se atingir o valor máximo, a pressão desce por patamares até à pressão atmosférica, o que se designa por extrusão;

- Registou-se a série de pares de valores do patamar de pressão/volume de mercúrio introduzido (ou extrudido) com o auxílio de um programa informático;
- Tratou-se os dados de forma a obter-se o conjunto de volumes de poros que têm um determinado diâmetro.

O ensaio de porosimetria de mercúrio realizou-se no porosímetro “Autopore IV 955” (Figura 4.18c), equipamento que dispõe de duas portas de baixa pressão e uma porta de alta pressão, o qual está associado a um software de cálculo e registo de dados.

Na figura 4.18 pode observar-se o porosímetro de mercúrio e penetrâmetro preparados para o ensaio.



a) pesagem do provete; b) colocação do provete na cápsula de um penetrâmetro; c) e d) porosímetro “Autopore IV 955”

Figura 4.18 - Porosímetro de mercúrio e penetrâmetro preparados para o ensaio

Considera-se que o volume de mercúrio que penetra no provete corresponde ao volume de poros acessíveis. A determinação do diâmetro  $D$  de um conjunto de poros através da porometria de mercúrio é dada por a expressão:

$$D = \frac{-4 \times \sigma \times \cos \theta}{P} [\text{m}] \quad (4.19)$$

Sendo:

$D$ , o diâmetro dos poros [m];

$\sigma$ , a tensão superficial do mercúrio [N/m];

$\theta$ , o ângulo de contacto entre o mercúrio e as paredes dos poros [°];

P, a pressão exercida [Pa].

Contrariamente a todos os ensaios anteriores, e devido ao custo e morosidade do ensaio, esta análise efectuou-se apenas a uma amostra de cada argamassa.

Os dados registados pelo porosímetro permitiram traçar gráficos de abcissas logarítmicas, que possibilitam observar essa evolução com as percentagens de mercúrio. Na tabela 4.13 indicam-se os resultados obtidos no ensaio de porometria de mercúrio.

Tabela 4.13 - Resultados do ensaio de porosimetria de mercúrio

Argamassa	Sigla <sup>1)</sup>	MVR [g/ml]	MVR [Kg/m <sup>3</sup> ]	MVA [g/ml]	MVA [Kg/m <sup>3</sup> ]	PA [%]
1	0N100R	1,8080	1808,0	2,8020	2802,0	35,48
2	25N75R	1,9236	1923,6	2,7767	2776,7	30,72
3	50N50R	1,8806	1880,6	2,624	2624,0	28,33
4	75N25R	1,8921	1892,1	2,8257	2825,7	33,04
5	100N0R	1,9071	1907,1	2,8077	2807,7	32,08

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Nas figuras 4.19 à 4.23 apresentam-se os resultados da intrusão do mercúrio em função do diâmetro dos poros em cada argamassa ensaiada.

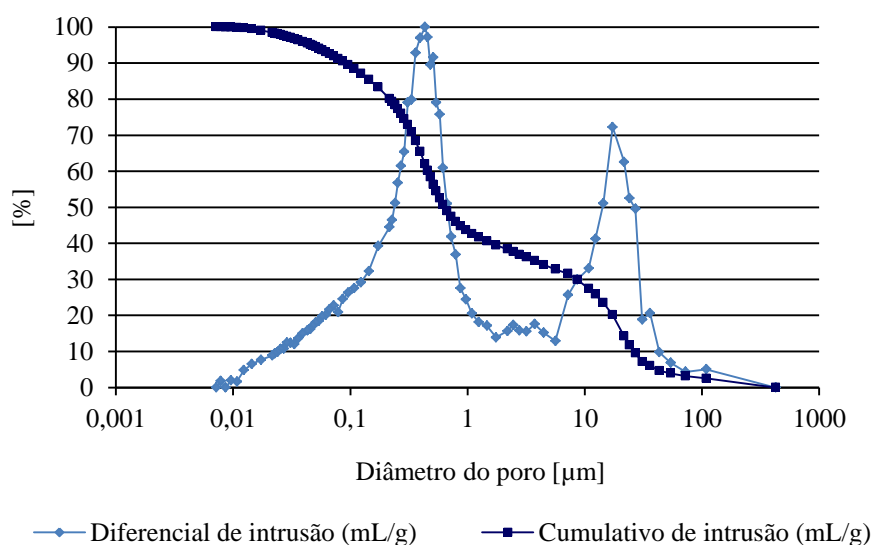


Figura 4.19 - Porosimetria de mercúrio da argamassa 0N100R

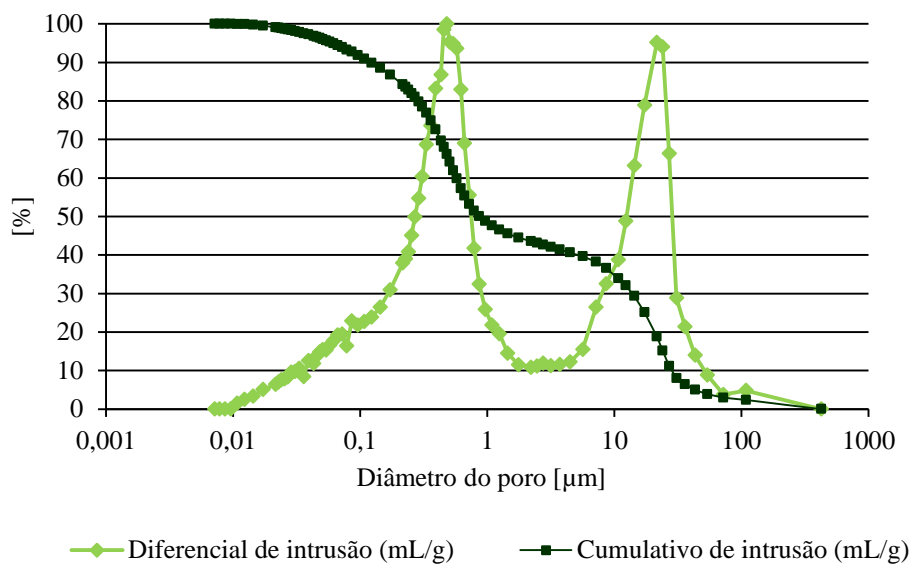


Figura 4.20 - Porosimetria de mercúrio da argamassa 25N75R

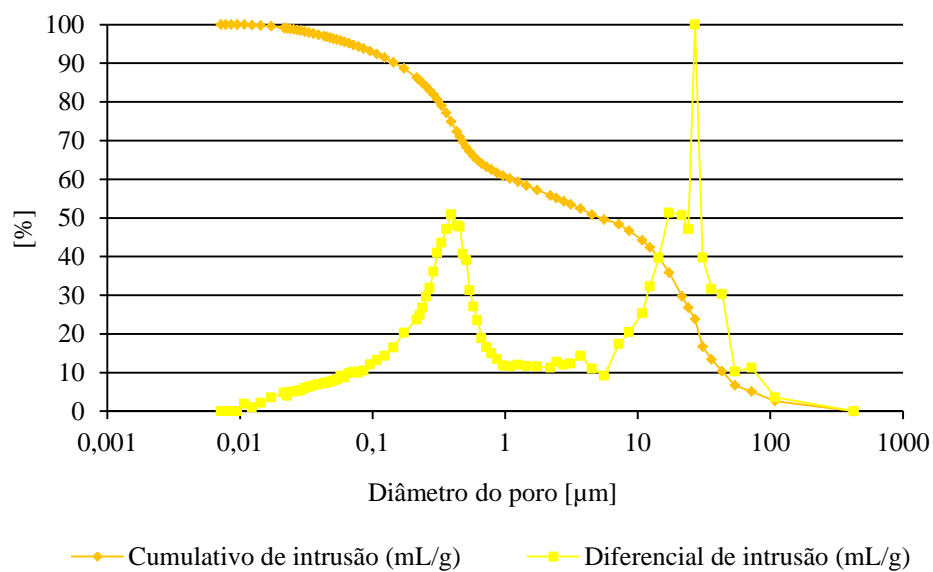


Figura 4.21 - Porosimetria de mercúrio da argamassa 50N50R



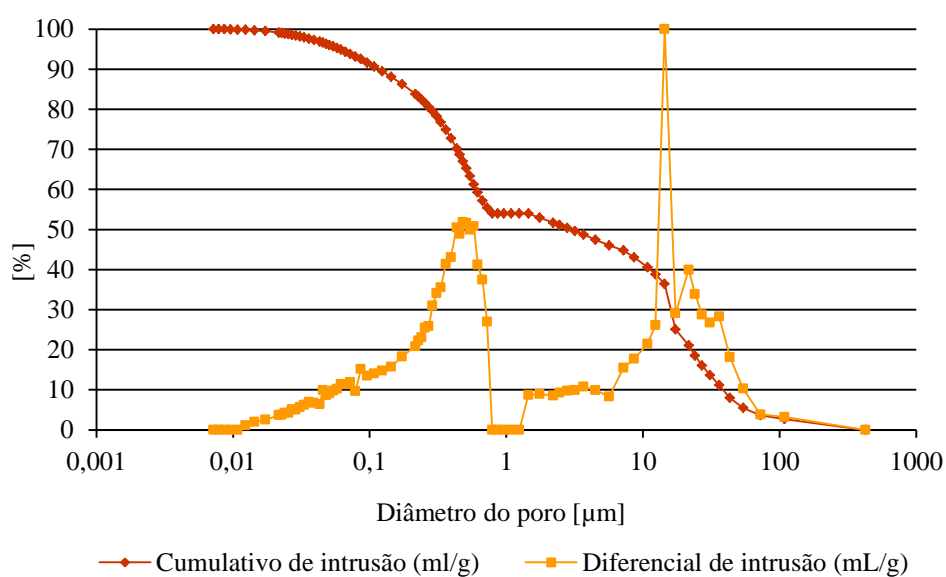


Figura 4.22 - Porosimetria de mercúrio da argamassa 75N25R

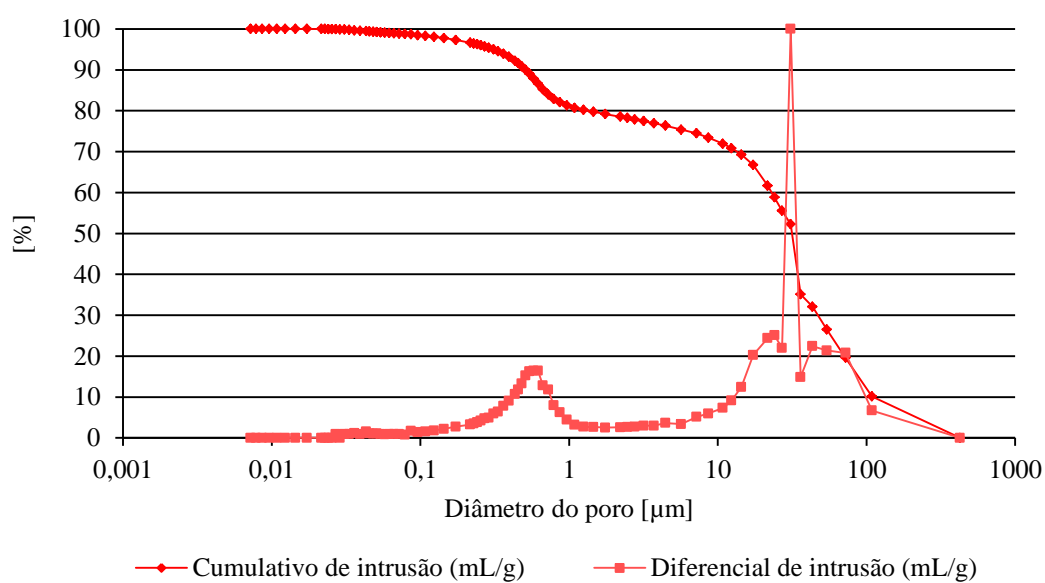


Figura 4.23 - Porosimetria de mercúrio da argamassa 100N0R

A análise por porosimetria de mercúrio permitiu obter informação sobre a distribuição do tamanho dos poros de cada amostra de argamassa.

Da análise das figuras 4.19 à 4.23, observa-se que a argamassa 100N0R é a argamassa com maior quantidade de macro poros e a argamassa 0N100R é a que apresenta menos quantidade de macro poros.

## 4.7. Síntese de resultados

Nesta secção são sintetizados os principais resultados obtidos no presente capítulo (Capítulo IV). Na tabela 4.14 e 4.15 apresenta-se respectivamente os valores médios dos ensaios de identificação realizados nos materiais e os valores médios dos ensaios de comportamento realizados nas argamassas.

Figura 4. 24 - Síntese dos ensaios de identificação realizados

<b>Material</b>		<b>Agregado fino Reciclado</b>	<b>Agregado Normalizado</b>	<b>Cal aérea</b>
Ensaio de identificação	Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]	1242,64	1627,02	294,84
	Granulometria	D [mm]	2,38	-
		d [mm]	0,075	-
		MF	3,36	-

Figura 4. 25 – Síntese dos ensaios de comportamento realizados

Argamassas <sup>1)</sup>			0N100R	25N75R	50N50R	75N25R	100N0R	
Ensaio de caracterização		Espalhamentos [%]	63,5	69,5	61,75	73,75	75,75	
Ensaio comportamento	Mecânicas	Edin [MPa]	1308,7	1493,1	1808,7	2663	2587,4	
		Rt [MPa]	0,6	0,5	0,6	0,5	0,4	
		Rc [MPa]	1,7	1,7	1,6	1,5	0,9	
		Ader. [MPa]	-	0,09	0,08	0,09	0,1	
	Físicas	MVR [kg/m³]	2418,4	2378,3	2328,9	2181,8	2279,9	
		MVA [kg/m³]	1719,6	1772,7	1834,2	1935,1	1894,0	
		PA [%]	29,9	25,5	21,2	10,6	16,9	
		Cca. [kg/m².h <sup>1/2</sup> ]	9,2	8,6	7,4	10,0	12,1	
		VA [kg/m²]	22,5	21,4	18,9	15,8	14,3	
		Secagem IS	0,013	0,011	0,008	0,006	0,005	
		Porosimetria de mercúrio	MVR [kg/m³]	1808,0	1923,6	1880,6	1892,1	1907,1
			MVA [kg/m³]	2802,0	2776,7	2624,0	2825,7	2807,7
			PA [%]	35,48	30,72	28,33	33,04	32,08

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

## 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 5.1. Considerações iniciais

Neste capítulo faz-se uma análise dos resultados obtidos no presente trabalho (relacionando as características das argamassas estudadas). Além disso compara-se os resultados obtidos com os referidos no capítulo III. As características físicas e mecânicas das argamassas estudadas, em várias investigações são comparadas tendo em conta diferentes autores terem utilizado agregados reciclados com composição e percentagens de substituição diferentes, assim como diferentes equipamentos, diferentes metodologias de ensaio e o traço.

### 5.2. Características das argamassas estudadas

Na tabela 5.1 apresenta-se a relação entre as características das argamassas estudadas

Tabela 5. 1 - Relação entre as características das argamassas estudadas

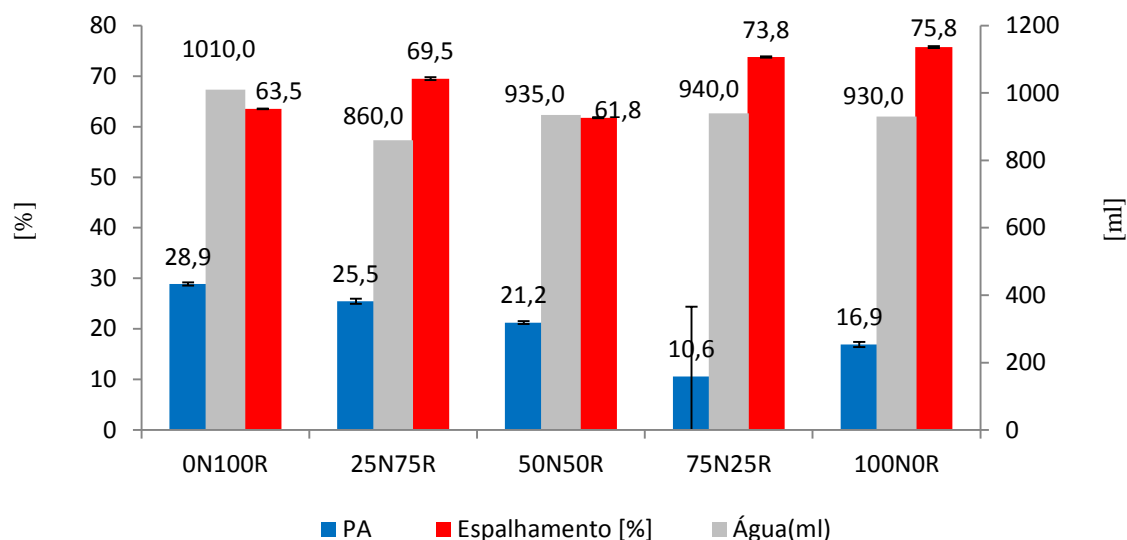
<i>Característica</i>	Esp. [%]	Edin [MPa]	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Ade. [MPa]	MVR [kg/m <sup>3</sup> ]	MVA [kg/m <sup>3</sup> ]	PA [%]	Cac [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]	VA [kg/m <sup>2</sup> ]	IS	TS [Kg/m <sup>2</sup> .h]	Porosimetria de mercúrio
Esp. [%]													
Edin [MPa]													
Rt [MPa]		✓											
Rc [MPa]		✓	✓										
Ader. [MPa]			✓	✓									
MVR [kg/m <sup>3</sup> ]													
MVA [kg/m <sup>3</sup> ]		✓											
PA [%]	✓	✓	✓	✓		✓	✓						
Cac[kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]								✓					
VA [kg/m <sup>2</sup> ]								✓					
IS								✓	✓	✓			
TS [Kg/m <sup>2</sup> .h]											✓		
Porosimetria						✓	✓	✓	✓		✓		

✓ - Característica comparável.

### 5.2.1. Argamassas em pasta

As argamassas em pasta são caracterizadas por o ensaio de espalhamento.

Na figura 5.1 apresenta-se os valores de espalhamento das argamassas em pasta estudadas.



Argamassa	Sigla <sup>1)</sup>	Ligante	Agregado	
		Cal aérea	Normalizado	Reciclado
1	0N100R	1	0	3
2	25N75R	1	3/4	9/4
3	50N50R	1	3/2	3/2
4	75N25R	1	9/4	3/4
5	100N0R	1	3	0

Figura 5.1 - Resultados médios de espalhamento, porosidade e quantidade de água das argamassas estudadas

Verifica-se na figura 5.1 que a argamassa 100N0R, apesar de ter maior quantidade de água apresenta menor percentagem de espalhamento em comparação com as restantes argamassas estudadas, tal situação esta associada ao facto de esta argamassa ser constituída por 100% de agregado fino reciclado, que contém partículas mais angulosas, logo o atrito entre partículas é maior e diminui o espalhamento.

O agregado fino reciclado tem uma maior presença de fracção fina de pó, que resulta da presença de partículas porosas resultantes de materiais cerâmicos entre outros. Esta característica leva a uma maior absorção de água. Assim verifica-se que a argamassa constituída por este agregado (fino reciclado) tem maiores valores de porosidade aberta

Para espalhamentos maiores, correspondem maiores quantidades de água, o que naturalmente leva a formação de argamassas endurecidas maior quantidade de poros, e assim a valores de porosidade aberta maiores.

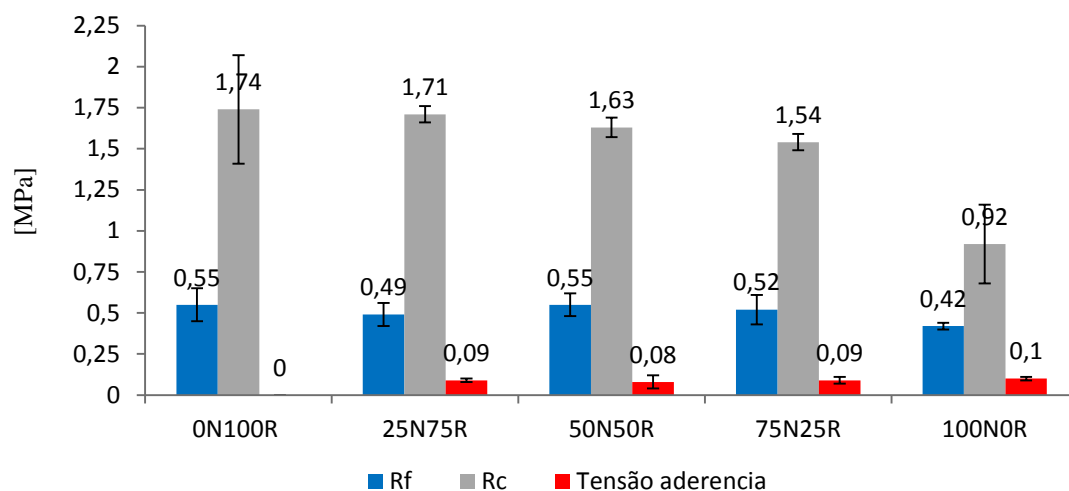
### 5.2.2. Argamassas endurecidas

A caracterização das argamassas no estado endurecido permitiu estudar as alterações das propriedades com a introdução de agregado fino reciclado. Os valores obtidos para cada argamassa são resultado da média dos valores dos provetes correspondentes em cada ensaio, tendo-se utilizado três provetes da mesma argamassa/cura (e um mínimo de três determinações) para cada ensaio. As características estudadas nas argamassas endurecidas foram:

- Módulo de elasticidade dinâmico;
- Resistência à tracção por flexão;
- Resistência à compressão;
- Aderência;
- Absorção de água por capilaridade;
- Secagem;
- Massa volúmica;
- Porosidade aberta;
- Porosimetria de mercúrio

#### Comportamento mecânico

Na figura 5.2 observa-se os resultados médios das resistências mecânicas e tensão de aderência.



Argamassa	Sigla <sup>1)</sup>	Ligante	Agregado	
		Cal aérea	Normalizado	Reciclado
1	0N100R	1	0	3
2	25N75R	1	3/4	9/4
3	50N50R	1	3/2	3/2
4	75N25R	1	9/4	3/4
5	100N0R	1	3	0

Figura 5. 2 - Relação entre os resultados médios das resistências mecânicas e resultados médios da tensão de aderência

Observa-se valores de tensão de aderência<sup>1)</sup> ao suporte baixos e próximos uns dos outros. Nos provetes da argamassa ON100R não foi possível realizar o ensaio de aderência, esta argamassa é constituída por 100% agregado fino reciclado que é um material mais heterogéneo, esta característica associada à reduzida espessura do provete (1,5 cm) mostrou ter uma influência directa nos resultados. Verifica-se que à medida que se introduz agregado normalizado o ensaio torna-se viável, notando-se um acréscimo nos valores.

Estes resultados traduzem uma resistência mecânica de arrancamento do suporte, que pode ser analisada como uma tensão ou força de tracção.

Ao relacionar os resultados deste ensaio com os resultados do ensaio de resistência mecânica de tracção por flexão, os valores deviam ter evoluções idênticas, o que não se verifica.

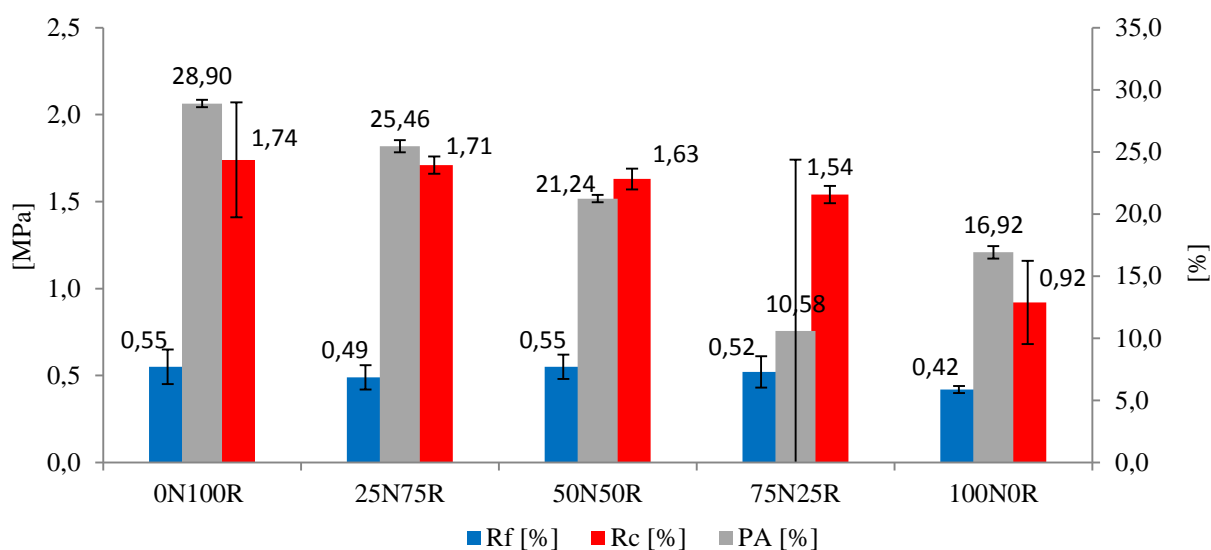
No entanto é necessário ter em conta a existência de factores de variabilidade, tais como a heterogeneidade da composição de cada argamassa, uma vez que o ensaio de aderência é realizado em provetes rectangulares de com espessura de 1,5cm e o ensaio de resistência mecânica de tracção por flexão em provetes prismáticos de 4cm de espessura.

Interessa referir que a presença de agregado fino reciclado nas argamassas de cal aérea ensaiadas leva a um aumento da sua rigidez, o que se pode justificar por as maiores dimensões deste agregado, a sua heterogeneidade, a predominância de partículas mais angulosas, tudo isto leva a um aumento do atrito entre partículas.

---

<sup>1)</sup> No decorrer do ensaio de aderência, durante a marcação dos locais de entalhe, deu-se a rotura antecipada do local de entalhe na fase de corte, do provete de argamassa constituída por 100% agregado reciclado (ON100R), devendo este ponto ser desprezado.

Na figura 5.3 observa-se os resultados médios das resistências mecânicas e os de porosidade aberta.



Argamassa	Sigla <sup>1)</sup>	Ligante	Agregado	
		Cal aérea	Normalizado	Reciclado
1	0N100R	1	0	3
2	25N75R	1	3/4	9/4
3	50N50R	1	3/2	3/2
4	75N25R	1	9/4	3/4
5	100N0R	1	3	0

Figura 5.3 - Relação entre os resultados médios das resistências mecânicas e os resultados médios de porosidade aberta.

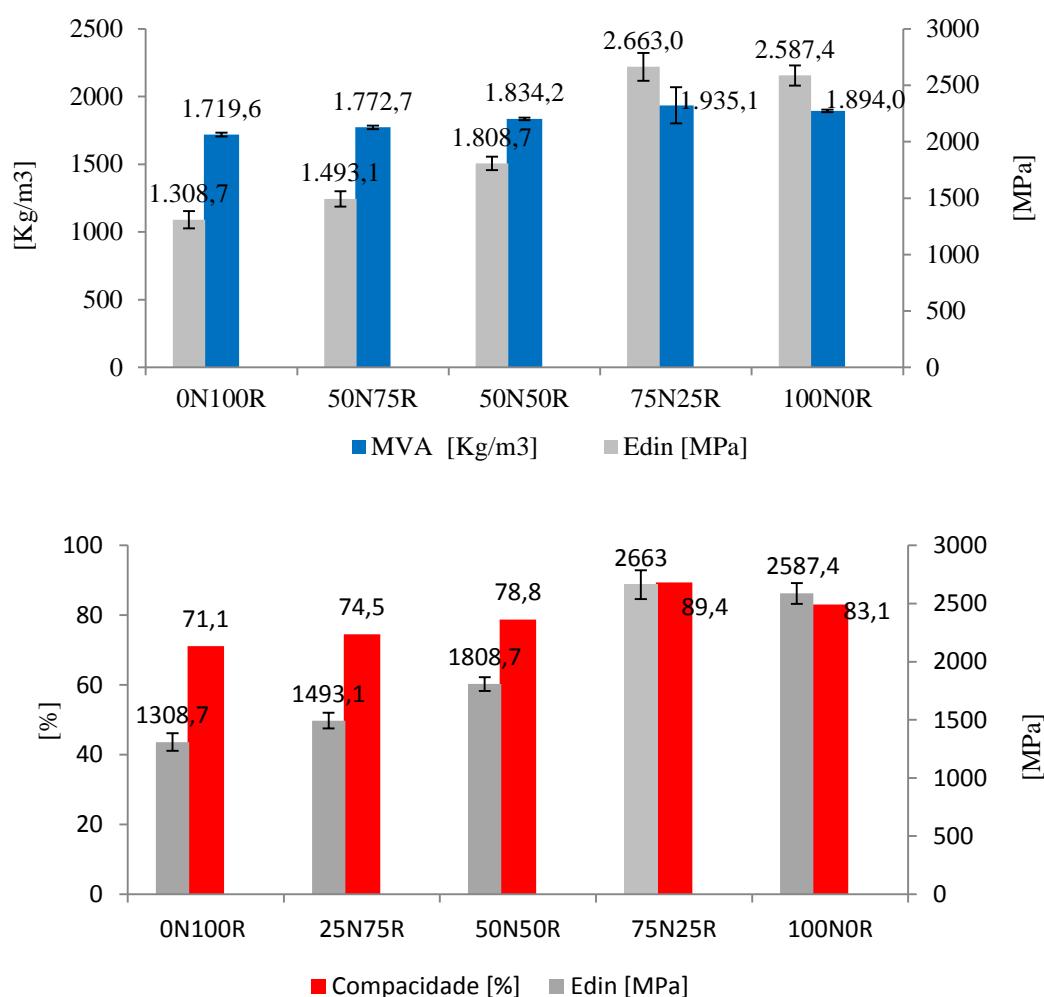
Verifica-se uma diminuição dos valores de resistências mecânicas e porosidade aberta, que acompanha a diminuição da percentagem de agregado fino reciclado na constituição das argamassas. Observa-se que quanto maior é a quantidade de agregado fino reciclado presente na argamassa, mais resistente e porosa esta será.

A regra de quanto mais porosa é uma argamassa, menos resistente esta será, não é verificada nem pode ser aplicada, uma vez que os provetes tem composições diferentes. É necessário ter em conta que na composição das argamassas contam agregados reciclados de origens diferenciadas.

Admite-se que as resistências das partículas são maiores que as do próprio provete, o que desequilibra a resistência das argamassas em função do agregado.

Assim pela análise do ensaio de granulometria, sabe-se que o agregado fino reciclado tem maiores partículas ( $MF=4.26$ ) do que o agregado normalizado ( $MF=3.36$ ), o que justifica maiores resistência em argamassas com maiores percentagens de agregado fino reciclado. A argamassa de cal aérea é mais susceptível às resistências mecânicas dos agregados que a constituem.

Uma vez que as resistências mecânicas apresentam uma evolução contrária à do módulo de elasticidade dinâmico, relaciona-se resultados de Edin com os resultados de MVA e de compacidade, na figura 5.4.



Argamassa	Sigla <sup>1)</sup>	Ligante			Agregado	
		Cal aérea	Normalizado	Reciclado		
1	0N100R	1	0	3		
2	25N75R	1	3/4	9/4		
3	50N50R	1	3/2	3/2		
4	75N25R	1	9/4	3/4		
5	100N0R	1	3	0		

Figura 5.4 - Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico com a massa volúmica aparente e compacidade.

Segundo a análise da figura 5.4 verifica-se um aumento do MVA, que corresponde a um aumento de valores de Edin. Ambas as grandezas aumentam com a diminuição de agregado fino reciclado. Uma maior deformabilidade das argamassas corresponde a um menor módulo de elasticidade, assim a argamassa com maior deformabilidade corresponde à constituída por 100% de agregado fino reciclado, que corresponde à argamassa com maior percentagem de porosidade.

Sabe-se que provetes constituídos por agregado normalizado tendem a ser mais homogêneos, e provetes constituídos por agregado fino reciclado tendem a ser mais heterogêneos. Assim pode dizer-se que provetes constituídos por 100% agregado normalizado terão maiores valores de



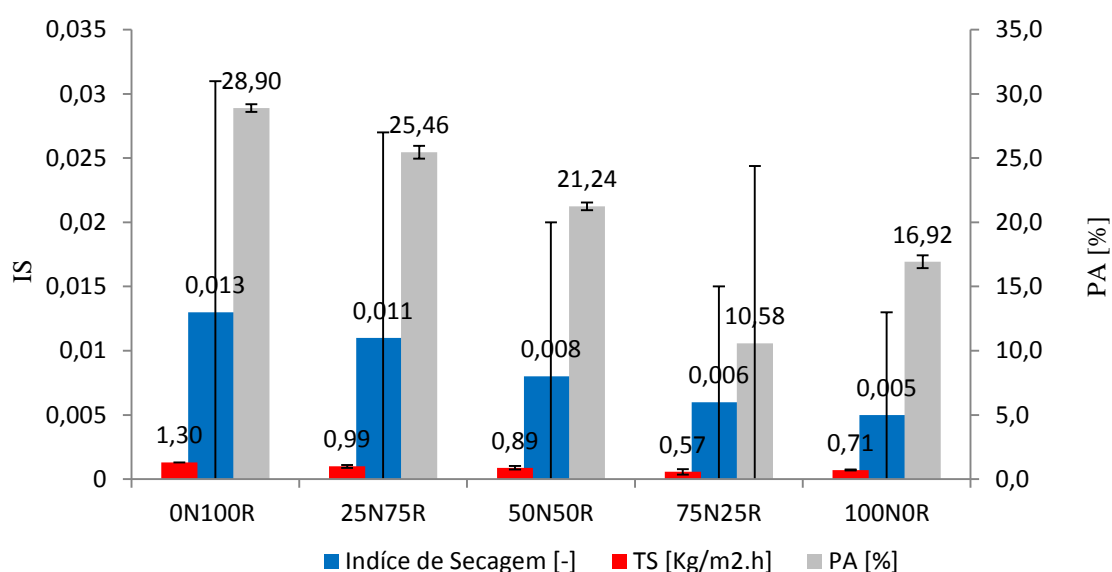
compacidade e consequentemente maiores valores de MVA. O inverso verifica-se para provetes constituídos por agregado fino reciclado.

### Comportamento à água

O comportamento das argamassas face à acção da água foi estudado através dos ensaios de absorção de água por capilaridade e secagem. Idealmente pretende-se que uma argamassa absorva o menor volume água e que essa absorção ocorra lentamente, o que se traduz em baixos valores de valor assintótico e de coeficiente de capilaridade, no caso do ensaio de absorção de água por capilaridade. Por outro lado pretende-se que a secagem se inicie de forma rápida e contínua, o que implica um elevado valor de taxa de secagem e um baixo valor de índice de secagem.

Sabe-se que, em virtude da influência do tipo de material estudado, este comportamento encontra-se directamente relacionado com a sua microestrutura interna, estudada neste trabalho através do ensaio de porosidade aberta e de porosimetria de mercúrio

Na figura 5.5 são apresentados os valores de taxa de secagem, índice de secagem e porosidade aberta das cinco argamassas ensaiadas.



Argamassa	Sigla <sup>1)</sup>	Ligante			Agregado	
		Cal aérea	Normalizado		Reciclado	
1	0N100R	1	0		3	
2	25N75R	1	3/4		9/4	
3	50N50R	1	3/2		3/2	
4	75N25R	1	9/4		3/4	
5	100N0R	1	3		0	

Figura 5.5 - Valores médios de taxa de secagem e índice de secagem

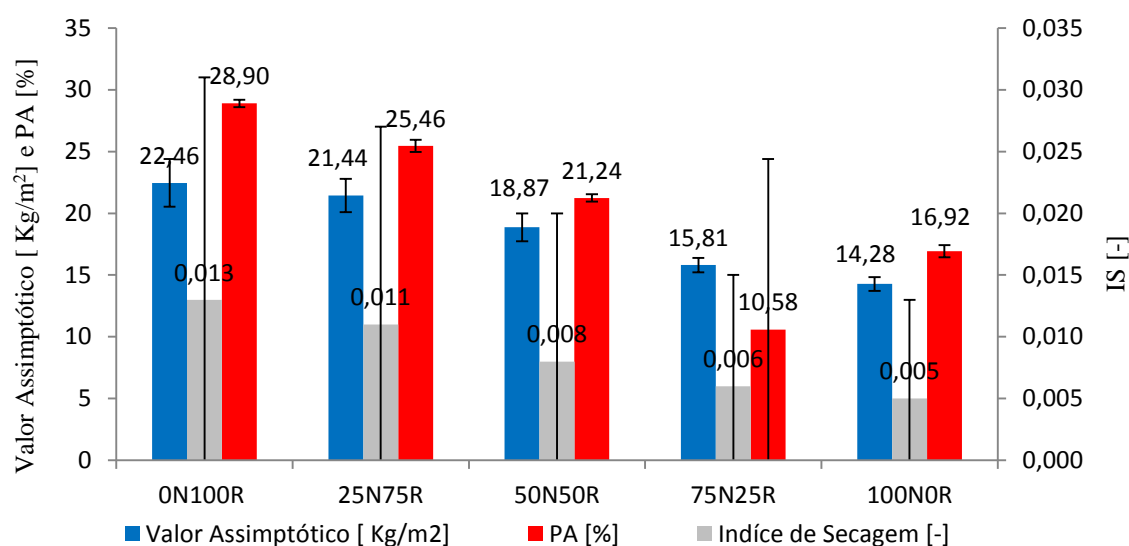
Observa-se valores de taxa de secagem (TS) e índice de secagem (IS) com evoluções idênticas. Verifica-se que à medida que se adiciona agregado fino reciclado os valores de IS e TS aumentam proporcionalmente, este comportamento justifica-se com os valores de porosidade aberta (Pab)

que tem a mesma evolução em função do teor de agregado final reciclado, que estas duas características.

A argamassa com valores mais elevados de Pab, terá naturalmente maior presença de poros, o que leva a velocidades de secagem mais elevadas, ou seja TS mais elevadas e IS também mais elevados que é indicador de uma secagem pouco constante.

É de notar valores de desvio padrão do índice de secagem bastante elevados, o que se justifica por possíveis erros ocorridos durante o ensaio de secagem, no entanto valida-se estes resultados como valores relacionáveis com outras características de modo a estudar o comportamento das argamassas.

Na figura 5.6 são apresentados os valores de porosidade aberta, índice de secagem e valor assintótico das cinco argamassas ensaiadas.



Argamassa	Sigla <sup>1)</sup>	Ligante	Agregado	
		Cal aérea	Normalizado	Reciclado
1	0N100R	1	0	3
2	25N75R	1	3/4	9/4
3	50N50R	1	3/2	3/2
4	75N25R	1	9/4	3/4
5	100N0R	1	3	0

Figura 5.6 - Relação entre os resultados médios do valor assintótico e valores de porosidade aberta e índice de secagem

Da análise da figura observa-se uma evolução crescente das três características analisadas em função do aumento da percentagem de agregado fino reciclado.

A argamassa com 100% de agregado fino reciclado é a que apresenta maiores valores de VA, PA e IS.

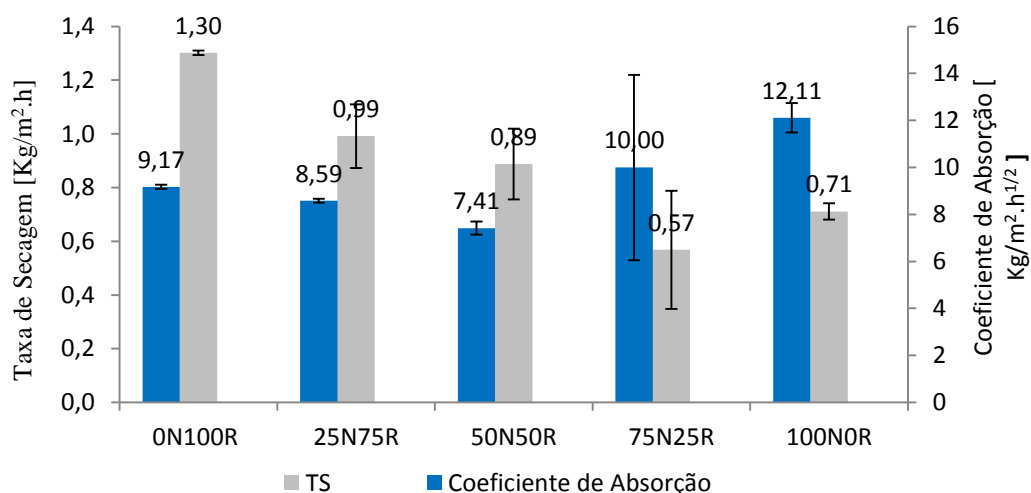
A argamassa com maior percentagem de agregado normalizado apresenta um melhor comportamento à água, uma vez que é a argamassa que apresenta menores valores de VA, o que significa que absorve menos água que as restantes argamassas ensaiadas. Isto justifica os baixos valores de porosidade aberta desta argamassa em comparação com as outras.

No caso desta argamassa (100N0R) o índice de secagem também regista os menores valores, o que traduz uma secagem de forma constante.

Pode dizer-se que com a presença de agregado fino reciclado as argamassas apresentam gradualmente maior quantidade de poros (maiores valores de  $P_{ab}$ ) e uma maior absorção de água (maiores valores de VA) o que leva a uma secagem irregular (valores de IS maiores).

É necessário ter em conta que os resultados do valor assintótico, não podem ser comparados com argamassas homólogas, por terem sido utilizados meios provetes, uma vez que nestas condições o volume total dos provetes a ser preenchido por água não é constante.

Na figura 5.7 é possível observar os valores registados de coeficiente de capilaridade e de taxa de secagem.



Argamassa	Sigla <sup>1)</sup>	Agregado		
		Ligante	Normalizado	Reciclado
		Cal aérea		
1	0N100R	1	0	3
2	25N75R	1	3/4	9/4
3	50N50R	1	3/2	3/2
4	75N25R	1	9/4	3/4
5	100N0R	1	3	0

Figura 5.7 - Relação entre os resultados médios do coeficiente de capilaridade e taxa de secagem

Da análise da figura 5.7 verifica-se uma evolução contrária nos resultados médios de taxa de secagem (TS) e coeficiente de absorção capilar (CC) obtidos nas argamassas estudadas.

À medida que se aumenta nas argamassas a presença de agregado fino reciclado, dá-se um aumento da TS e uma diminuição do CC.

Estas duas características traduzem a velocidade de absorção de água por capilaridade e a velocidade de secagem.

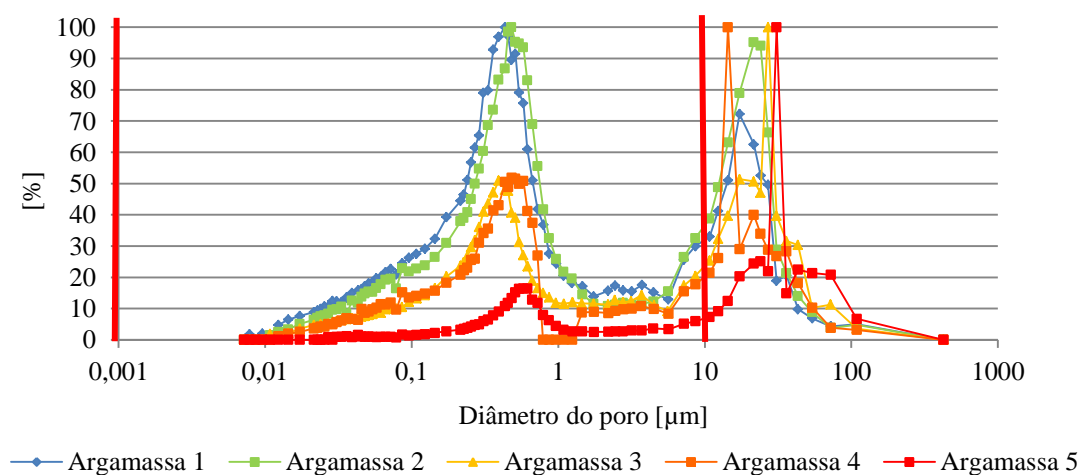
Na argamassa constituída por 100% agregado normalizado é onde se verifica maiores valores de CC, o que traduz uma rápida absorção de água por ascensão capilar, o que se pode justificar por a presença de vários poros de menores dimensões. Esta conclusão pode ser validada pela análise da porosimetria de mercúrio. Nesta argamassa (100N0R) verifica-se os valores de TS mais pequenos, o que traduz uma secagem mais lenta inicialmente, o que também é justificável por a quantidade de poros e as dimensões dos mesmos.

### Porosimetria de mercúrio

Sabe-se que a porosidade aberta influencia tanto a absorção de água por capilaridade como a secagem, pois é através dos poros que o transporte de água e vapor ocorrem, bem como a ligação com o exterior. Para além do estudo desta característica, é também importante analisar a dimensão e conexão dos poros – porosimetria.

Este ensaio é realizado em função da pressão de intrusão do mercúrio, inicialmente com valores de menor pressão o mercúrio ocupa os poros com maiores dimensões, à medida que se aumenta a pressão de intrusão o mercúrio consegue chegar a poros de dimensões cada menores.

Na figura 5.8 observa-se os resultados do diferencial de intrusão das argamassas ensaiadas, que traduz o volume de mercúrio que entra em que em função do diâmetro dos poros.



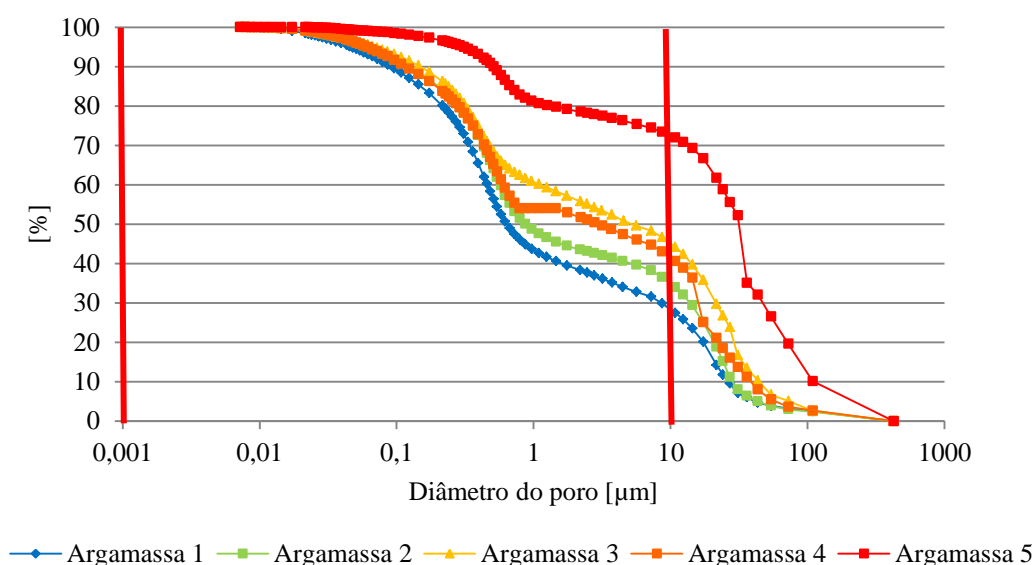
Argamassa	Sigla <sup>1)</sup>	Agregado		
		Ligante Cal aérea	Normalizado	Reciclado
1	0N100R	1	0	3
2	25N75R	1	3/4	9/4
3	50N50R	1	3/2	3/2
4	75N25R	1	9/4	3/4
5	100N0R	1	3	0

Figura 5.8 - Diferencial de intrusão das argamassas ensaiadas

Esta análise permite concluir que a argamassa constituída apenas por agregado normalizado (100N0R) é a que apresenta poros de maiores dimensões (macro poros), o que devia corresponder a uma taxa de secagem (TS) maior que as restantes argamassas ensaiadas, que traduz uma secagem mais rápida, o que não se verifica uma vez que segundo o ensaio de secagem esta argamassa será a que apresenta velocidades de secagem menores (figura 5.7) o que se justifica devido a esta argamassa ser a que apresenta menos quantidade de poros, ou seja valores de porosidade aberta mais pequenos.

A argamassa com maior teor de agregado fino reciclado (0N100R) é a que apresenta maior quantidade de poros com dimensões menores (poros capilares), o que se esperava seria valores de CC elevados para esta argamassa, ou seja elevadas velocidades de absorção de água por capilaridade. No entanto pela análise da figura 5.7 observa-se que a esta argamassa correspondem valores de CC que não são dos mais elevados, antes pelo contrário. Estes resultados podem dever-se aos resultados de porosidade aberta serem bastante elevados para estas argamassas.

Na figura 5.9 observa-se a evolução do Cumulativo Intrusão das argamassas ensaiadas em função do diâmetro dos poros.



Argamassa	Sigla <sup>1)</sup>	Ligante			Agregado	
		Cal aérea	Normalizado	Reciclado		
1	0N100R	1	0	3		
2	25N75R	1	3/4	9/4		
3	50N50R	1	3/2	3/2		
4	75N25R	1	9/4	3/4		
5	100N0R	1	3	0		

Figura 5. 9- Cumulative Intrusão das argamassas ensaiadas

Esta análise permite concluir que a argamassa de cal aérea constituída apenas por agregado reciclado (0N100R), é a que apresenta maior quantidade de poros, assim é natural que esta

argamassa tenha um elevado índice de secagem (IS) e uma taxa de secagem (TS) maior, que traduz uma secagem mais rápida e irregular.

Ainda da análise da figura 5.9 pode observa-se que a argamassa com maior teor de agregado normalizado é a que tem maior quantidade de poros com maiores dimensões (macro poros).

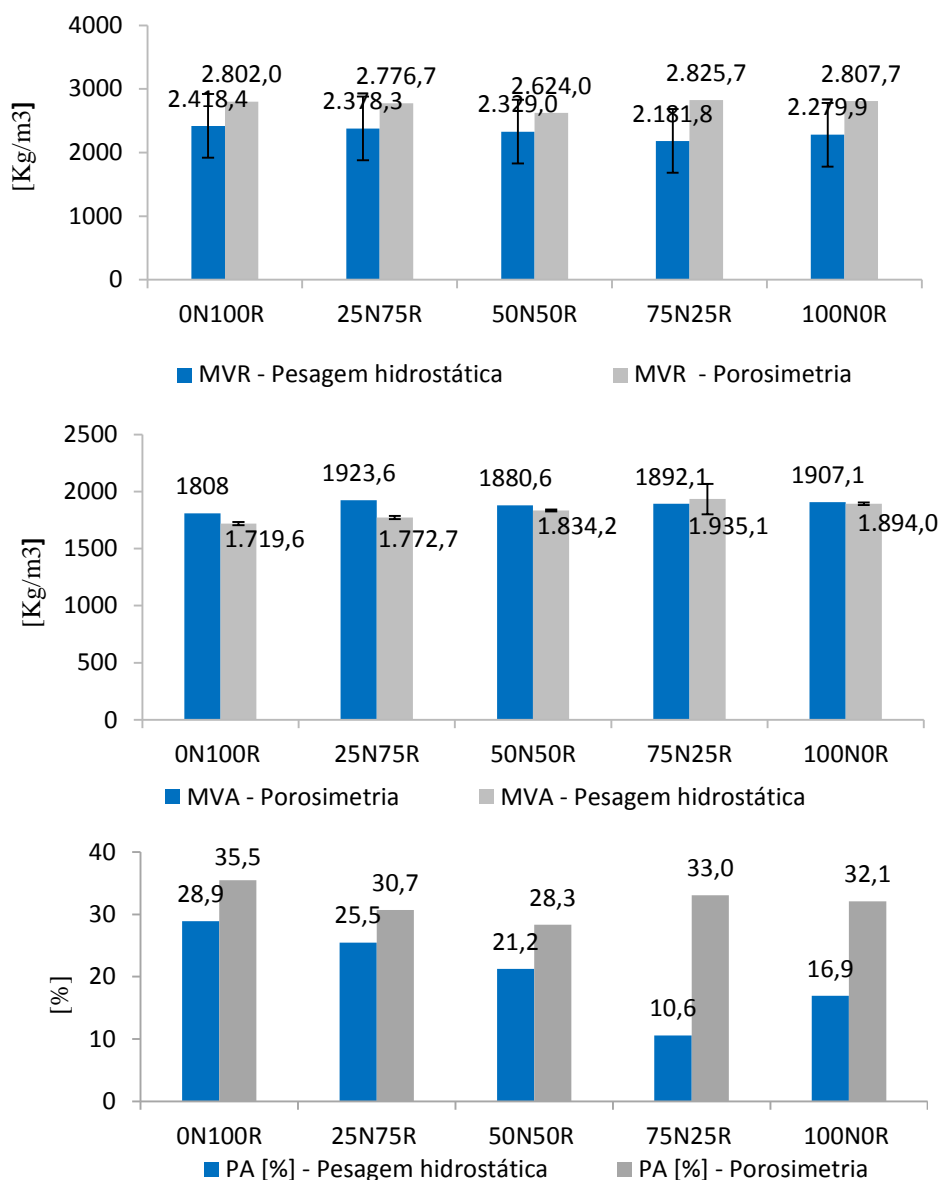
### ***Comparação de resultados do ensaio de porosimetria com o ensaio de pesagem hidrostática***

Na figura 5.10 registam-se os valores obtidos de massas volúmicas e porosidade segundo o ensaio de porosimetria de mercúrio e pelo método hidrostático.

Tendo em conta as variabilidades entre estes dois métodos, esta análise mostrou-se enriquecedora para este estudo.

A análise dos resultados obtidos pelos dois métodos permite constatar que as diferenças de resultados entre estes são mínimas o que se constitui como um facto positivo, uma vez que o método hidrostático (que se pensava ser menos preciso sendo no entanto mais simples de executar, face à porosimetria, método mais dispendioso, complexo e menos sustentável), apresenta valores muito próximos e aceitáveis, com vantagens laboratoriais evidentes. O método hidrostático apresenta-se então como um método fiável a utilizar quando se pretender aferir acerca da porosidade aberta e da massa volúmica aparente.

Os resultados do ensaio de porosimetria de mercúrio são maiores o que se justifica por este ensaio ser mais destrutivo, uma vez que os provetes são sujeitos a pressões de intrusão.



Argamassa	Sigla <sup>1)</sup>	Ligante	Agregado	
		Cal aérea	Normalizado	Reciclado
1	ON100R	1	0	3
2	25N75R	1	3/4	9/4
3	50N50R	1	3/2	3/2
4	75N25R	1	9/4	3/4
5	100N0R	1	3	0

Figura 5. 10 - Comparação entre massa volúmica real obtida por pesagem hidrostática e por porosimetria

### 5.3. Características de argamassas de outros trabalhos pesquisados.

Em relação às características de outros autores, tendo em conta os factores de variabilidade tais como a razão  $a/l$  (que influencia o espalhamento), a granulometria do ligante e do agregado, o tipo de agregado, o traço, o tipo de equipamento de ensaio e o procedimento seguido, não é possível comparar directamente os resultados obtidos na presente dissertação com os resultados

observados dos ensaios de outros autores. Contudo apresentam-se os resultados para enquadrar os valores da presente dissertação.

### 5.3.1. Ensaios de Identificação - Caracterização física dos agregados

A caracterização física dos constituintes das argamassas estudadas, consideram-se os valores obtidos no ensaio de determinação da baridade dos agregados e o módulo de finura dos mesmos.

#### Baridade

Na figura 5.11 e 5.12 apresentam-se os resultados do ensaio da baridade

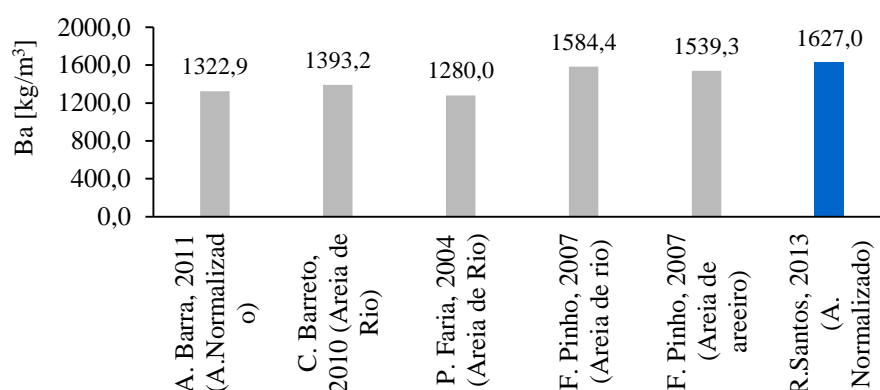


Figura 5.11 - Resultados do ensaio de baridade de agregado normalizado

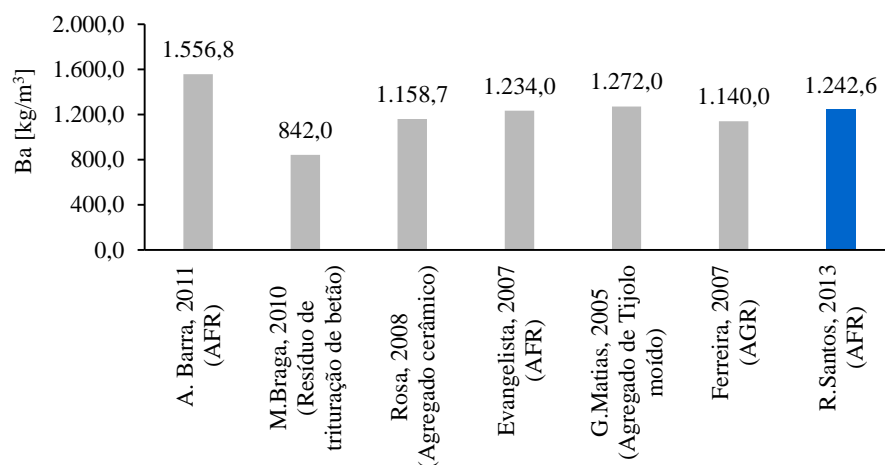


Figura 5.12 - Resultados do ensaio de baridade de agregado reciclado

Tendo em conta os resultados obtidos na figura 5.11 e 5.12 para o ensaio de baridade da presente dissertação para o agregado normalizado e para o agregado fino reciclado, verifica-se que o agregado reciclado apresenta valores de baridade menores do que os agregados normalizados.



### Módulo de finura

Na figura 5.13 e 5.14 apresentam-se os resultados obtidos na presente dissertação e por outros autores de módulo de finura.

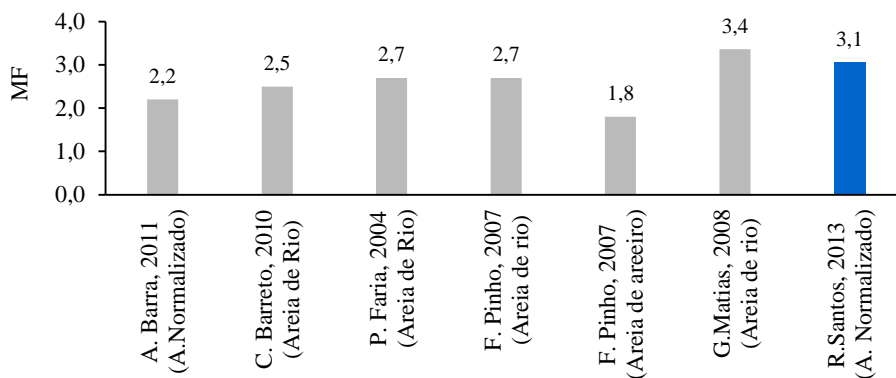


Figura 5.13 - Resultados do módulo de finura do agregado normalizado

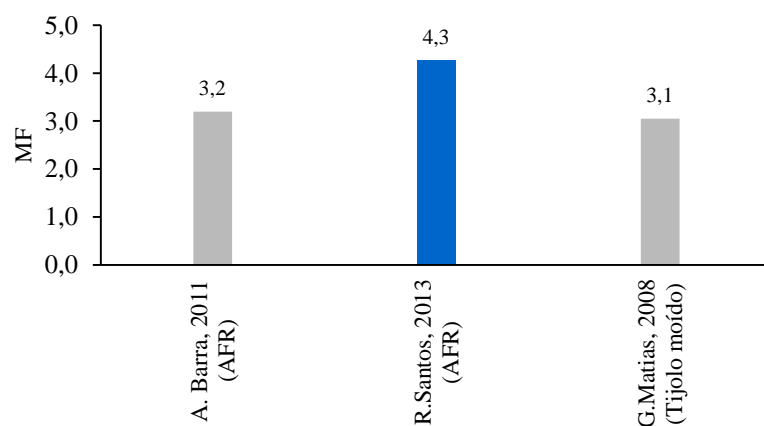


Figura 5.14 - Resultados do módulo de finura dos agregados finos reciclados

Da análise das figuras 5.13 e 5.14, verifica-se valores de módulos de finura maiores para agregado fino reciclado, o que justifica por este material ser mais heterógeno e de maiores dimensões que o agregado normalizado.

Tendo em conta os factores de variabilidade entre os trabalhos analisados, verifica-se que os valores de módulo de finura obtidos na presente dissertação para ambos os agregados estudados, enquadram-se na gama de resultados de módulo de finura observados em outros trabalhos.

### **5.3.2. Ensaios de Caracterização - Caracterização da argamassa em pasta**

Na figura 5.15 apresentam-se os valores obtidos na presente dissertação e por outros do ensaio de espalhamento.

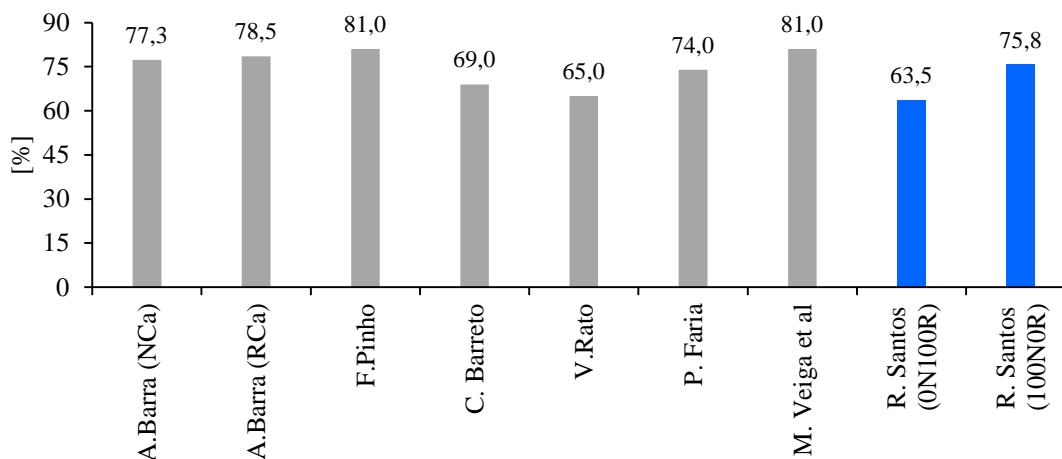


Figura 5.15 - Resultados do ensaio de espalhamento

Observa-se que as argamassas contendo agregados finos reciclados apresentam maiores resultados de espalhamentos, devido a uma maior necessidade de água a adicionar à mistura, assim como nos resultados de A. Barra (Barra, 2011), onde se observa maiores resultados de espalhamento no caso de argamassa com agregado fino reciclado (Nca). Estes resultados podem justificar-se com a composição do agregado reciclado, sendo este constituído por partículas mais angulosas, será necessária a presença de mais água para fazer frente a um maior atrito, aumentando assim os valores de espalhamento.

### **5.3.3. Ensaios de Comportamento - Caracterização da argamassa endurecida**

Sobre as argamassas endurecidas realizaram-se ensaios de comportamento, nomeadamente a determinação da resistência mecânicas, módulo de elasticidade, aderência ao suporte, massa volúmica, porosidade aberta, absorção de água por capilaridade, secagem e porosimetria de mercúrio.

### Módulo de elasticidade dinâmico

Na figura 5.16 apresentam-se resultados do módulo de elasticidade dinâmico de vários autores.

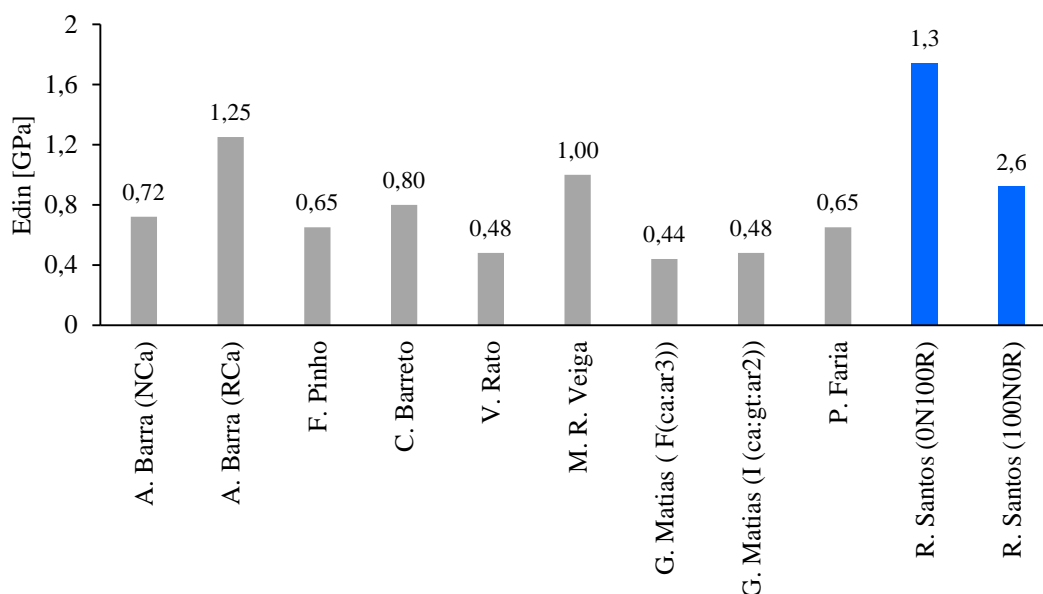


Figura 5.16 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico

Em comparação com os resultados de outros autores, verifica-se que a argamassa da presente dissertação composta por 100% agregado reciclado (0N100R) apresenta valores bastante mais elevados de módulo de elasticidade dinâmico.

### Resistência à tracção por flexão e resistência à compressão

Na figura 5.17 e 5.18 apresenta-se os valores obtidos no ensaio de resistência à tracção por flexão e à compressão respectivamente, na presente dissertação e por outros autores.

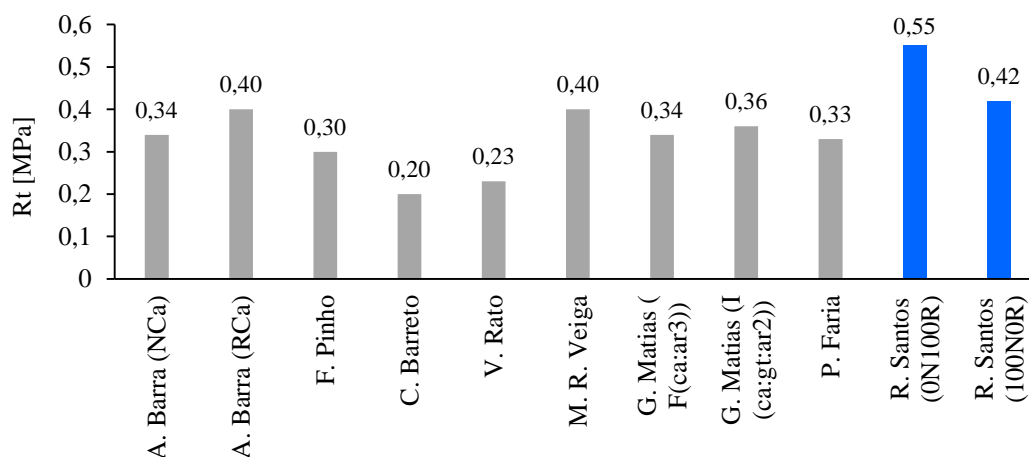


Figura 5.17 - Resultados do ensaio de determinação das resistências mecânicas à tracção por flexão

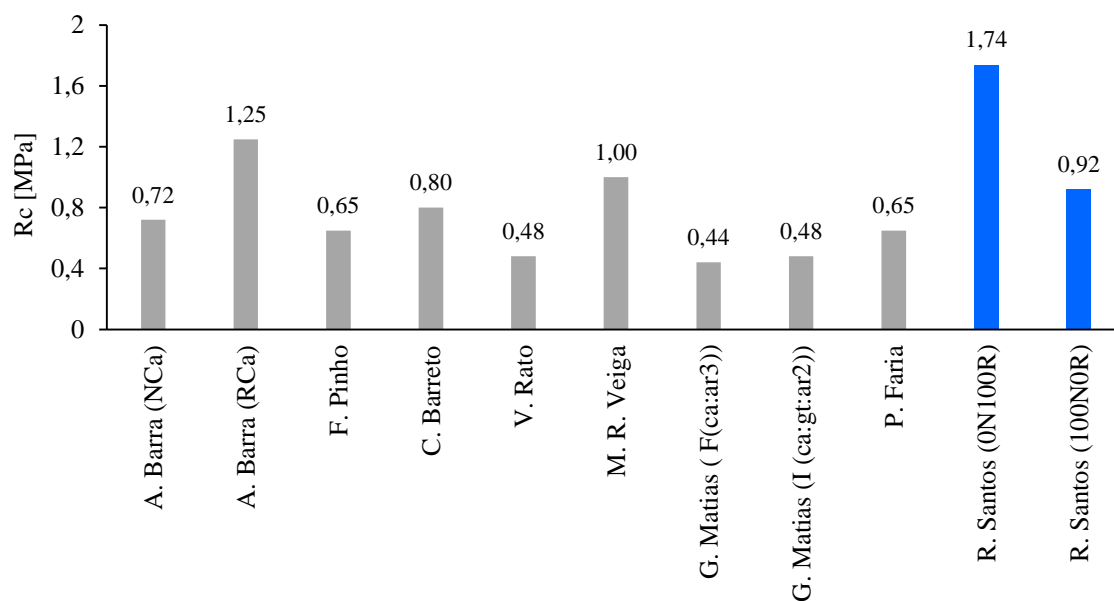


Figura 5.18 - Resultados do ensaio de determinação das resistências mecânicas à compressão

Da análise da figura 5.17 e 5.18, verifica-se que os valores obtidos de resistências mecânicas enquadram-se na gama de valores observados nas outras investigações, no entanto a argamassa constituída com 100% de agregado reciclado apresenta em ambas as resistências um pico.

O mesmo se verifica na argamassa de A. Barra (RCa), o que se justifica por a presença de agregado fino reciclado, que leva a maiores resistências devido à sua composição.

#### Aderência ao suporte

Na figura 5.19 apresenta-se os resultados do ensaio de aderência ao suporte na presente dissertação e por outros autores.

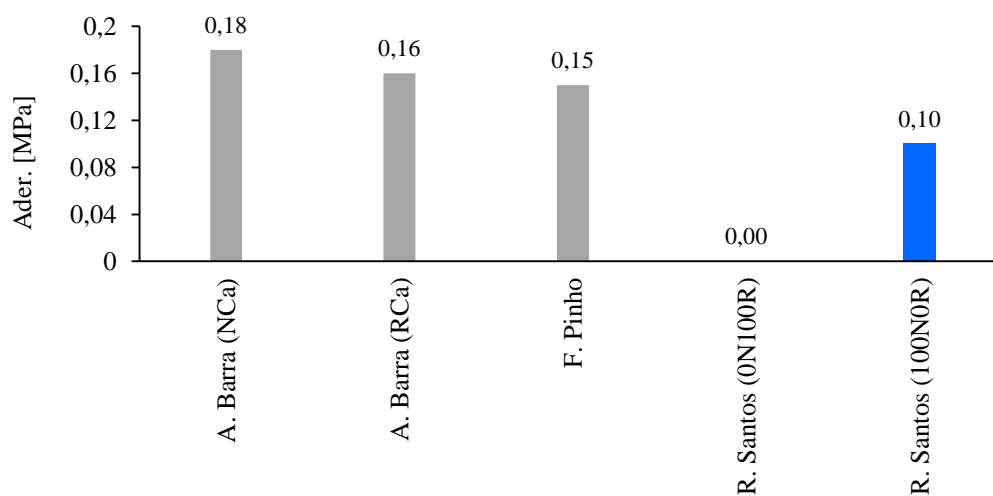


Figura 5.19 - Resultados do ensaio de aderência ao suporte

Em comparação com outros autores observa-se valores de tensão de aderência ao suporte muito baixos.

### ***Massa volúmica real e massa volúmica aparente***

Nas figuras 5.20 e 5.21 apresentam-se os resultados de MVR e MVA obtidos na presente dissertação e por outros autores.

Tendo em conta que estas características dependem de factores de variabilidade que interferem na sua comparação, faz-se apenas uma análise da ordem de grandeza dos resultados obtidos.

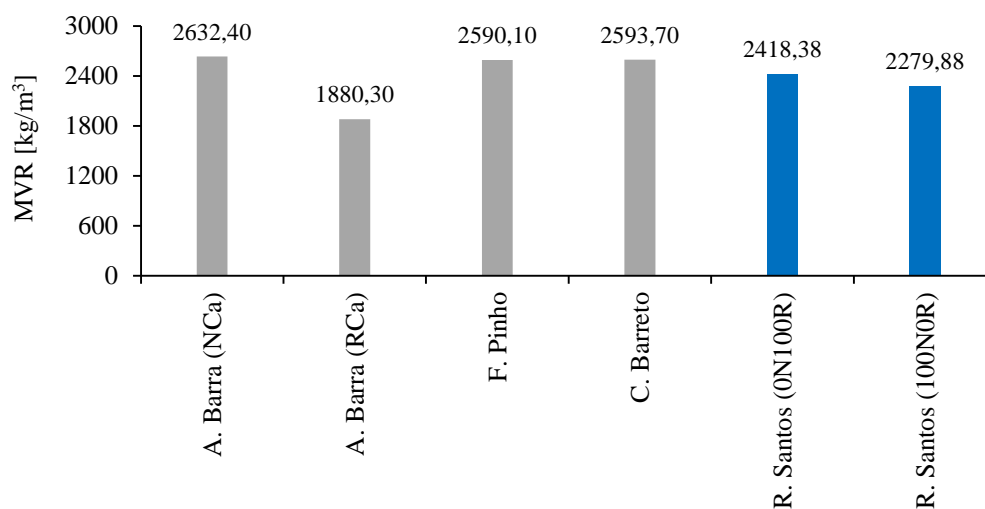


Figura 5.20 - Resultados do ensaio de massa volúmica real

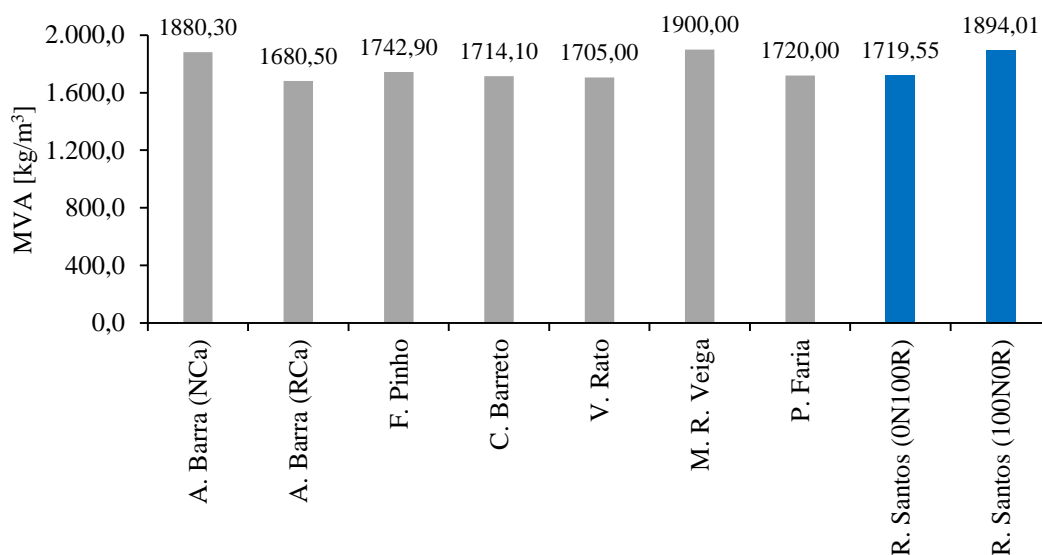


Figura 5.21 - Resultado do ensaio de massa volúmica aparente

Da análise das figuras 5.20 e 5.21, observa-se que os resultados obtidos na presente dissertação enquadram-se na ordem de grandeza dos resultados de MVA e MVR obtidos por outros autores para argamassas de cal aérea.

Na figura 5.22 apresentam-se os resultados de porosidade aberta obtidos na presente dissertação e por os outros autores.

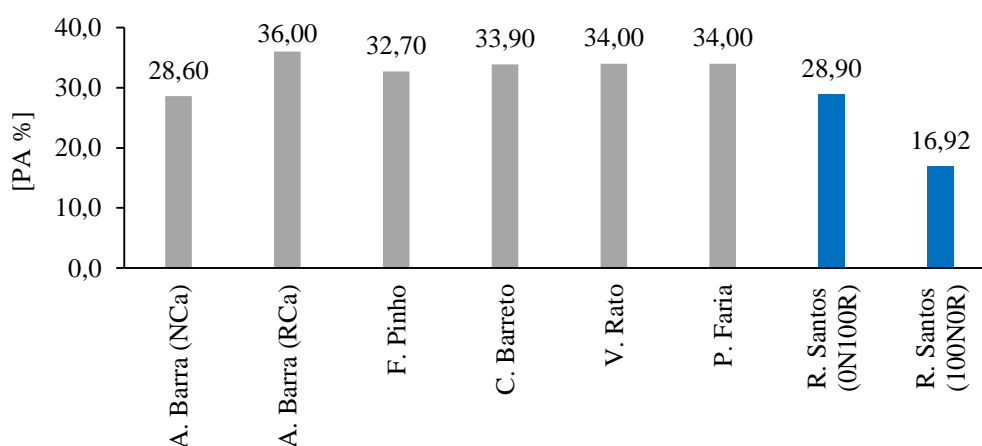


Figura 5.22 - Resultados do ensaio de porosidade aberta

A argamassa constituído por 100% agregado normalizado (100N0R) do presente trabalho, apresenta valores muito inferiores à gama de valores de outros autores para a porosidade aberta.

### ***Absorção de água por capilaridade***

No presente trabalho, o ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado com meios provetes, como tal os valores obtidos de valor assintótico não serão discutidos e comparados com os resultados dos autores estudados.

Na figura 5.23 e 5.24 regista-se a ordem de grandeza dos resultados obtidos na presente dissertação e de outros autores para este ensaio.

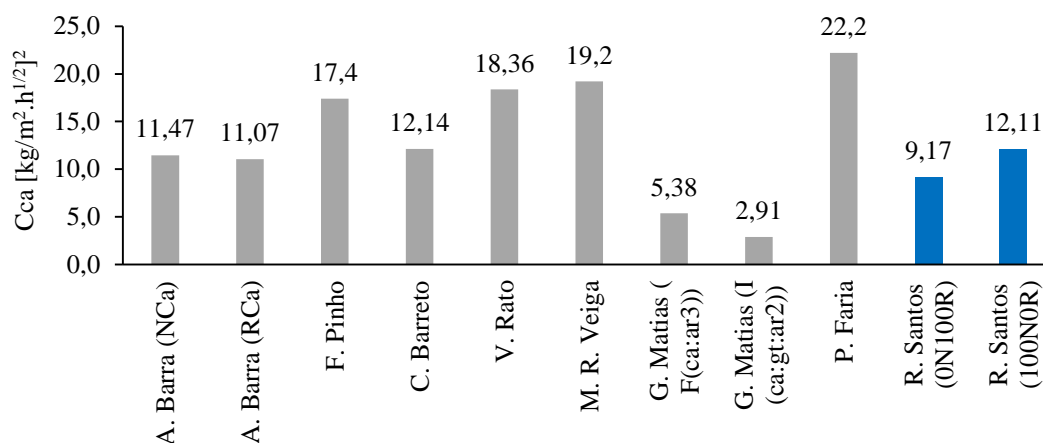


Figura 5.23 - Resultados obtidos no coeficiente de absorção de água por capilaridade

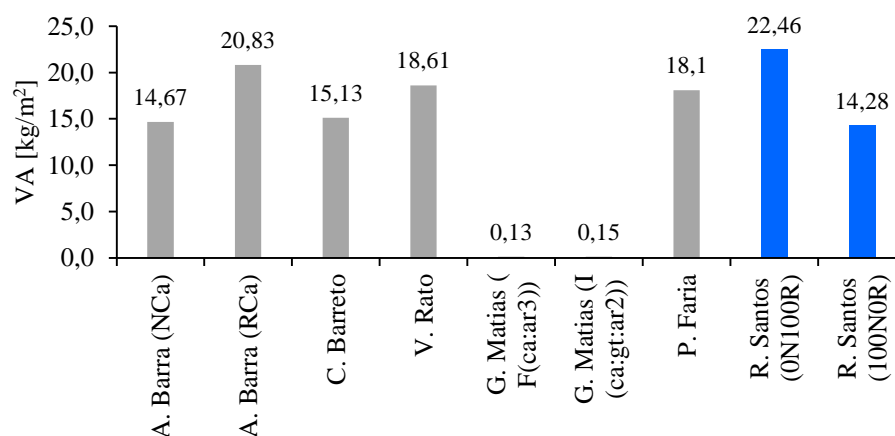


Figura 5.24 - Resultados obtidos de valor assintótico

Segundo V. Rato (Rato, 2006) o coeficiente de absorção de água por capilaridade (velocidade inicial de absorção de água) depende de factores tais como a dimensão dos poros e a conectividade da rede porosa, assim quanto menor for a porometria (dimensão do poro capilar), maior será a quantidade de água absorvida por capilaridade.

Observa-se que os valores da presente dissertação, se encontram enquadrados na gama de resultados dos outros autores.

### Secagem

Na figura 5.25 regista-se os resultados obtidos no ensaio de secagem na presente dissertação e por outros autores para este ensaio

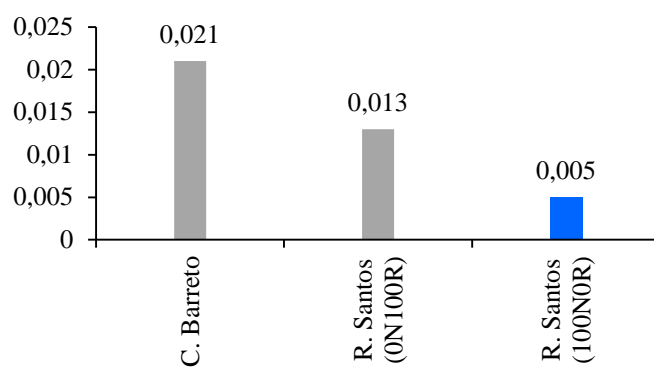


Figura 5.25 - Resultados obtidos de índice de secagem



## **6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

### **6.1. Considerações Iniciais**

É importante que existam estudos e investigações que se debrucem sobre a indústria da construção, no sentido de incentivar a reutilização e a reciclagem dos resíduos, como alternativa à deposição em aterro.

Desta forma, antes que o resíduo de construção e demolição se possa consagrar como subproduto da construção civil, é interessante mostrar a viabilidade na utilização do material, eliminar todas as incertezas sobre o seu comportamento quando incorporado na produção de novos materiais e, de seguida, tentar implantar técnicas de manuseio diferentes das existentes actualmente (Leite, 2001). É importante passar por todas estas fases de modo a que o produto resultante da reciclagem possa competir com o original (produto natural) em termos de qualidade, quantidade e custo.

Assim, se compreende a importância da realização deste trabalho, como os de tantos outros que têm sido realizados sobre a aplicação de resíduos provenientes da construção e demolição em argamassas e betões, com o objectivo de diminuir simultaneamente a quantidade de resíduos depositados em aterro e o uso de recursos naturais. Se a este objectivo se juntar o facto de se conseguir melhorar algumas das propriedades de argamassas, as possibilidades destas aplicações se tornarem viáveis num futuro muito próximo são ainda maiores.

Sendo o objectivo da presente investigação a análise experimental a influência de agregados reciclados provenientes de RCD no desempenho de argamassas de cal aérea, foram moldados e ensaiados vários provetes de argamassa de cal aérea e agregado fino reciclado em substituição gradual de agregado normalizado ao traço volumétrico 1:3 (ligante: agregado). As propriedades obtidas foram apresentadas, analisadas e comparadas com as argamassas homólogas de outras investigações inseridas na temática de RCD, tendo em conta a variabilidade presente. Neste capítulo analisa-se o trabalho desenvolvido, sintetizam-se as conclusões obtidas, confrontam-se os objectivos propostos e os alcançados e referem-se possíveis desenvolvimentos futuros.

### **6.2. Conclusões e comentários finais**

A poupança de recursos primários ou naturais, que, quando substituídos por material dito secundário, para além do impacte ambiental positivo, tem a vantagem de reduzir a dependência dos materiais primários, diminuindo o volume de resíduos produzidos e, consequentemente, a

quantidade de resíduos enviados para aterro. Isto é particularmente importante em zonas densamente povoadas, onde os recursos naturais e o espaço para construção de aterros são mais limitados.

Da discussão de resultados no capítulo anterior, admite-se como uma solução viável a utilização de agregado fino reciclado em soluções construtivas em que é necessária uma maior rigidez das argamassas, uma vez que este agregado confere boas características mecânicas às argamassas.

Observou-se um aumento da velocidade de secagem, com o aumento da percentagem de agregado fino reciclado e maiores porosidades para maiores percentagens de agregado fino reciclado. Assim conclui-se que este agregado leva a uma maior formação de poros e por consequência a secagens mais rápidas.

As argamassas compostas por agregado fino reciclado estudadas apresentam um comportamento bastante satisfatório, em termos de resistências e comportamento à água. Têm como vantagem a utilização de material que seria depositado em aterro, em substituição parcial de areia, diminuindo assim o consumo de recursos naturais e reduzindo gastos energéticos e maiores teores de CO<sub>2</sub> associados.

### **6.3. Objectivos propostos e alcançados**

O principal objectivo proposto na presente dissertação consistiu na análise do ponto de vista experimental, do comportamento físico e mecânico de argamassas cal aérea não estruturais com agregados finos reciclados provenientes de RCD em substituição de agregado normalizado (areia de rio), e contribuir para um melhor conhecimento das características dos RCD, na perspectiva de viabilizar a sua aplicação em argamassas. Considera-se que os objectivos propostos foram alcançados.

### **6.4. Propostas para desenvolvimentos futuros**

O presente trabalho de investigação permitiu aprofundar o conhecimento adquirido ao longo do curso sobre a temática em questão, propriedades das argamassas com incorporação de agregados naturais e agregados provenientes de resíduos, em particular de RCD, em substituição da areia, possibilitando, desta forma, a possível redução da exploração deste recurso natural finito.

Assim, espera-se que o estudo apresentado contribua significativamente para o desenvolvimento sustentável da indústria da construção, com forte incidência no desenvolvimento tecnológico da indústria da reciclagem de agregados provenientes de RCD.

Neste trabalho de investigação, e uma vez que o tempo é limitado, procurou-se abordar os aspectos fundamentais acerca da temática de argamassas modificadas, procurando-se, sempre que necessário, justificar os resultados com base em evidências.

Após terminado o estudo, é certo que não se esgotaram as propostas para futuros desenvolvimentos dentro da mesma área e ficam sempre outros aspectos que se podem aprofundar um pouco mais. Assim, no futuro, seria interessante investigar:

- A substituição de areia por agregado fino reciclado (ou outros resíduos da construção e demolição) para mais variedade de percentagens de substituição.
- A alteração das condições do ambiente de cura dos provetes verificando a sua influência no comportamento das argamassas;
- A durabilidade e o comportamento a longo prazo das argamassas com resíduos de RCD através de outros ensaios;
- O desenvolvimento da tecnologia de produção de argamassas com incorporação de agregados reciclados provenientes da construção e demolição juntamente com outros resíduos;
- Observações em microscópio electrónico (MEV) para analisar a estrutura cristalina da argamassa com os agregados reciclados e compreender como interagem;
- Ensaios de espectrometria por difracção de raios x, permitindo estabelecer o teor de cimento existente nos agregados reciclados;
- Análises químicas e petrográficas para identificação da presença de sais nos agregados reciclados e detectar a presença, ou não, de reacções álcalis-sílica nos mesmos.
- A avaliação do comportamento deste tipo de argamassas aplicadas directamente sobre suportes reais e nomeadamente do seu comportamento à fendilhação e permeabilidade à água sobre baixa pressão, assim como a comparação de algumas características macroestruturais e outras com a avaliação realizada em laboratório.

Generalizando para a área de estudo onde a presente dissertação se insere, que é o reaproveitamento dos resíduos da construção e demolição, têm sido alvo de muitos estudos as aplicações em base e sub-base de pavimentos, fabrico de betões e argamassas e matéria-prima para a fabricação de tijolos e blocos de betão ou solo-cimento em que o que vai variando é o tipo ou natureza do agregado reciclado (cerâmicos, betões, argamassas, entre outros).

Seria pois interessante investigar novas possíveis aplicações para além das atrás referidas. Como ver de que modo certos resíduos da construção e demolição e industriais (borracha, vidro, plásticos, cinzas, cortiça, entre outros) poderiam ser utilizados em materiais de isolamento térmico e acústico.



## 7. BIBLIOGRAFIA

[1] AGOSTINHO, Cláudia Sofia (2007) - *Estudo da evolução do desempenho no tempo das argamassas de cal aérea*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.

[2] ALVES, Fátima (2007) - *Betões com agregados reciclados levantamento do “STATE-OF-THE-ART”*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Lisboa.

[3] ANGULO, S. C. (2000) - *Variabilidade de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e demolição Reciclados*; Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.

[4] BARRA, Ana Teresa (2011) - *Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil – Perfil de Construção. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

[5] BARRETO, Carolina (2010) - *Durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas face à acção de sais solúveis*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

[6] BIO Intelligence Service. European Coimmission (DG ENV), project under the Framework contract ENV.G.4/FRA/2008/0112 - “Service contract on manegement of construction and demolition waste”, Draft Final Report Task 2, Paris, 2010.

[7] BRAGA, Mariana (2010) - *Desempenho de argamassas com agregados finos provenientes da trituração do betão – efeito de filer e pozolânico*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

[8] BRITO, Jorge de (2005) - *Agregados reciclados e a sua influência nas propriedades dos betões*. Lição de síntese, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

- [9] BRITO, Jorge de (2004) - *“Reciclagem e reutilização dos resíduos da construção e demolição”*. Conferência sobre a gestão de resíduos e recursos em Portugal, Lisboa, 16 p.
- [10] CARNEIRO, F. - *Diagnóstico e acções da actual situação dos resíduos de construção e demolição na cidade de Recife*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana – PPGEU, Universidade Federal da Paraíba, 2005.
- [11] COM (Comunicação da comissão europeia) Para uma estratégia temática de prevenção e reciclagem de resíduos, Comissão das Comunidades Europeias, Bruxelas, 2003.
- [12] COELHO, Ana Zulmira; TOGAL F. Pacheco; JALALI, Said (2009) – A cal na construção. Edições TecMinho.
- [13] COUTINHO, António Sousa (1997) – *Fabrico e propriedades do betão*. Volume I. 3ª edição, LNEC, Lisboa.
- [14] Decreto-Lei n.º 46/2008, de 12 de Março, alterado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho
- [15] FARIA, Maria Paulina (2004) - *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.
- [16] FERREIRA, José Fernando Bolarinho (2009) - *Aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD) em camadas de sub-base não ligadas de estradas de baixo tráfego*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [17] FIORITI, Cesar Fabiano; AKASAKI, Jorge Luís; MARQUES, Maria Lidianne - *Influência de Diferentes Granulometrias de Resíduos de Pneus em Argamassa*. Congresso: APFAC, 2010.
- [18] GONÇALVES, Paulo (2007) - *Betão com Agregados Reciclados análise comentada da legislação existente*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

- [19] GUERREIRO, Carlos; HENRIQUES, Fernando M. A.; PINTO, Ana Paula – Análise comparativa de argamassas de cal aérea, medianamente hidráulicas e de ligantes mistos para rebocos de edifícios antigos. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Auditório FIL, Lisboa, 2007.
- [20] GRILO, João Pedro (2013) - *Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.
- [21] INR “*Relatório - Gestão de resíduos de construção e demolição em Portugal*”, Projecto Reagir - Reciclagem de entulho no âmbito da gestão integrada dos resíduos, Montemor-o-Novo, Outubro 2006.
- [22] INSTITUTO DOS RESÍDUOS (1999); “Plano Estratégico Sectorial de Gestão de Resíduos Industriais (PESGRI)”, Lisboa.
- [23] INSTITUTO PORTUGUES DA QUALIDADE (IPQ) - Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade. NP EN 459 – 1:2011.
- [24] IPQ - *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica – Método de peneiração*. NP EN 933:1-2000.
- [25] IPQ - *Ensaio para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Método para determinação da baridade e dos vazios*. NP EN 1097-3:2002.
- [26] JADOVSKI, I. - *Directrizes técnicas e económicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição*, Tese de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005, 178 p.
- [27] LAMPREIA, N. ; VEIGA, R. (2012) - *Utilização de argamassas com resíduos incorporados na reabilitação de revestimentos de edifícios*, Congresso Nacional “Construção 2012”, Coimbra.
- [28] LEITE, Mónica Baptista (2001) - *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

- [29] LUCAS, Vanessa (2011) - *Construção Sustentável – Sistema de Avaliação e Certificação*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil – Perfil de Construção. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.
- [30] MÁLIA, Miguel Ângelo (2010) - *Indicadores de resíduos de construção e demolição*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [31] Matias, Gina (2012) - *Argamassas de cal aérea com resíduos de cerâmica*. 4º Congresso Português de argamassas e etics, Universidade de Coimbra
- [32] MIRANDA, C. (2009) - *Modelo para a gestão de resíduos de construção e demolição, uma solução para as empresas de construção civil (ilha de São Miguel – Açores)*, Dissertação de Mestrado em Ambiente Saúde e Segurança, Universidade dos Açores.
- [33] MIRANDA, Leonardo F. R.; SELMO, Sílvia M. S. (2001) - *Desempenho de revestimentos de argamassa de entulho reciclado*. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil;
- [34] NENO, Catarina (2010) - *Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão – integração de RCD*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [35] OLIVEIRA, Renata (2012) - *Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de vidro - Efeito de fíler e pozolânico*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [36] PENACHO, Paulo Medeiros (2012) - *Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de vidro – RCD e RAS*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [37] PEDRO, Diogo (2011) - *Desempenho de argamassas fabricadas com incorporação de materiais finos provenientes da trituração de pneus*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.



- [38] PEDROZO, Ruben Francisco Esteche (2008) - *Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [39] PEREIRA, Tiago (2008) - *Optimização das características de humedecimento e secagem das argamassas*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Especialidade de Reabilitação de Edifícios, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- [40] PINHO, Fernando F. S. (2007) - *Paredes de alvenaria ordinária. Estudo experimental com modelos simples e reforçados*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Especialidade de Ciências da Construção, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- [41] Portaria nº 209/2004 de 3 de Março do Decreto-Lei Nº 239/1997, de 9 de Setembro,
- [42] Portaria n.º 732-A/96, de 11 de Dezembro
- [43] RATO, Vasco Moreira (2006) - *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de Doutoramento - Especialidade de Reabilitação do Património Edificado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- [44] RODRIGUES, Fernando André (2011) - *Caracterização dos agregados finos reciclados provenientes de centrais de reciclagem portuguesas*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [45] SOUSA, Fábio José (2003) - *Estudo e desenvolvimento de alternativas para o aproveitamento de resíduos das indústrias de revestimentos cerâmicos*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [46] SOUSA, H. (2008), “ *Gestão de Resíduos de Construção e Demolição*”, Revista de Informação Técnica e Científica Indústria e Ambiente, N.º 53.
- [47] UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA (UNL) / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL (DEC), *Análise de argamassas. Determinação da aderência*. Fe 21, Monte da Caparica, UNL/FCT, Maio de 1996.

[48] UNL/FCT, *Análise de argamassas. Determinação da resistência à flexão e compressão*. Fe 27, Monte da Caparica, UNL/FCT, Janeiro de 1999.

[49] UNL/FCT, *Análise de argamassas. Preparação dos provetes*. Fe 19, Monte da Caparica, UNL/FCT, Julho de 1996.

[50] UNL/FCT, *Pedras naturais e artificiais. Determinação da absorção de água por capilaridade*. Fe 06, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1999.

[51] UNL/FCT, *Pedras naturais e artificiais. Determinação do índice de secagem*. Fe 07, Monte da Caparica, UNL/FCT, Julho de 1996.

[52] UNL/FCT, *Inertes para argamassas e betões. Determinação da baridade*. Fe 15, Monte da Caparica, UNL/FCT, Maio de 1996.

[53] UNL/FCT, *Pedras naturais e artificiais. Determinação da massa volúmica*. Fe 01, Monte da Caparica, UNL/FCT, Maio de 1996.

[54] UNL/FCT, *Pedras naturais e artificiais. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico*. Fe 08, Monte da Caparica, UNL/FCT, Maio de 1996.

[55] UNL/FCT, *Pedras naturais e artificiais. Determinação da porosidade aberta*. Fe 02, Monte da Caparica, UNL/FCT, Maio de 1996.

[56] VEIGA, M. Rosário (1997); “*Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação*”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

[57] VEIGA, Maria do Rosário; PEDRO, Diogo; BRITO, Jorge - *Desempenho de argamassas com materiais finos provenientes da trituração de pneu*. Congresso: APFAC, Lisboa, 2010.

[58] VEIGA, M. Rosário; “*Rules for awarding application documents to cement-based mineral binders ready-mixed claddings for walls*” (in Portuguese), Report 427/05 - NRI, LNEC, Lisbon, 2005;

- [59] VEIGA, M. Rosário (2005); “*Comportamento de rebocos para edifícios antigos: Exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos*”, Seminário “Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos”, Lisboa, LNEC.
- [60] VEIGA, M. Rosário (2005); “*Comportamento de revestimentos de fachadas com base em ligante mineral*”, 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC.
- [61] VEIGA, M. Rosário (2009); “*Patologia de argamassas de alvenaria*”, 3º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de edifícios, PATORREB, Porto.
- [62] VEIGA, Maria do Rosário et al (2004) - *Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos*. Coleção Edifícios n.º9. LNEC, Lisboa.
- [63] Resíduos de construção e demolição. Website: <http://coletivourbane.blogspot.pt/2012/10/os-residuos-da-construcao-e-demolicao.html>, em Setembro de 2012.
- [64] Plano de prevenção e gestão de resíduos de construção e demolição. Website: [http://www.apambiente.pt/\\_zdata/Políticas/Resíduos/FluxosEspecificosResíduos/RCD/ModeloPPGRCD.pdf](http://www.apambiente.pt/_zdata/Políticas/Resíduos/FluxosEspecificosResíduos/RCD/ModeloPPGRCD.pdf), em Abril de 2013.
- [65] Entidades Gestoras de Resíduos. Website: [http://sirapa.apambiente.pt/SIRAPA\\_Licencas/Pesquisar\\_LER.aspx/pages/principal.aspx](http://sirapa.apambiente.pt/SIRAPA_Licencas/Pesquisar_LER.aspx/pages/principal.aspx), em Maio de 2013.
- [66] Reciclagem de Pneus. Website: <http://www.recipneu.com>, em Outubro de 2013.



---

**ANEXO**  
RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS PROVETES DE  
ARGAMASSA

## 1. Considerações iniciais

Neste anexo identificam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física e mecânica dos constituintes utilizados na preparação das argamassas de cal aérea e de todos os provetes de argamassa ensaiados.

## 2. Ensaio de caracterização física dos constituintes das argamassas

### • Baridade dos agregados e ligantes

Na tabela I.1 apresentam-se os resultados médios obtidos no ensaio de determinação da baridade das três amostras de agregado fino normalizado e ligantes e das nove amostras de agregado fino reciclado realizadas. O ensaio para determinação da baridade dos agregados realizou-se nos dias 18 e 19 de Março de 2012.

Tabela I.1 - Valores de baridade de cada amostra de agregado e ligante

Material		Massa [g]	Volume recipiente [cm3]	Baridade [kg/m³]	Baridade méd. [kg/m³]	
Agregado fino reciclado	Amostra 1	964,1	750	1285,5	1278,1	1242,6
		967		1289,3		
		944,7		1259,6		
	Amostra 2	926,5		1235,3	1221,4	
		903,2		1204,3		
		918,4		1224,5		
	Amostra 3	913,8		1218,4	1228,4	
		919,2		1225,6		
		930,9		1241,2		
Agregado Normalizado	Amostra 1	1219	1625,3	1627		
		1191,8	1589,1			
		1250	1666,7			
Cal aérea	Amostra 1	219,3	292,4	294,8		
		219	292			
		225,1	300,1			

### • Granulometria dos agregados

#### Análise granulométrica do agregado normalizado

Na tabela I.2 apresentam-se os resultados médios obtidos no ensaio de granulometria das três amostras ensaiadas de agregado fino normalizado. Apresentam-se também a curva granulométrica correspondente, figura I.1.

Tabela I.2 - Amostra de agregado normalizado – média de 3 amostras recolhidas na mesma zona

Peneiro	Malha [mm]	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
3/4''	19,1	0,00	0,00	100,00	0,00
1/2''	12,7	0,00	0,00	100,00	0,00
3/8''	9,52	0,00	0,00	100,00	0,00
n.º4	4,76	0,00	0,00	100,00	0,00
n.º8	2,38	0,37	0,03	99,97	0,03
n.º16	1,19	0,63	0,05	99,93	0,07
n.º30	0,595	918,73	68,90	31,03	68,97
n.º40	0,425	63,67	4,77	26,25	73,75
n.º50	0,297	46,90	3,52	22,73	77,27
n.º70	0,212	69,03	5,18	17,56	82,44
n.º100	0,149	101,97	7,65	9,91	90,09
n.º120	0,125	71,17	5,34	4,57	95,43
n.º170	0,09	9,73	0,73	3,84	96,16
n.º200	0,075	50,43	3,78	0,06	99,94
Refugo	-	0,80	0,06	0,00	100,00
Totais	Totais	1333,43	100,00	715,85	784,15
Módulo de finura	3,36				
Máxima dimensão do agregado (D) =2,38mm; Mínima dimensão do agregado (d) = 0,075mm					

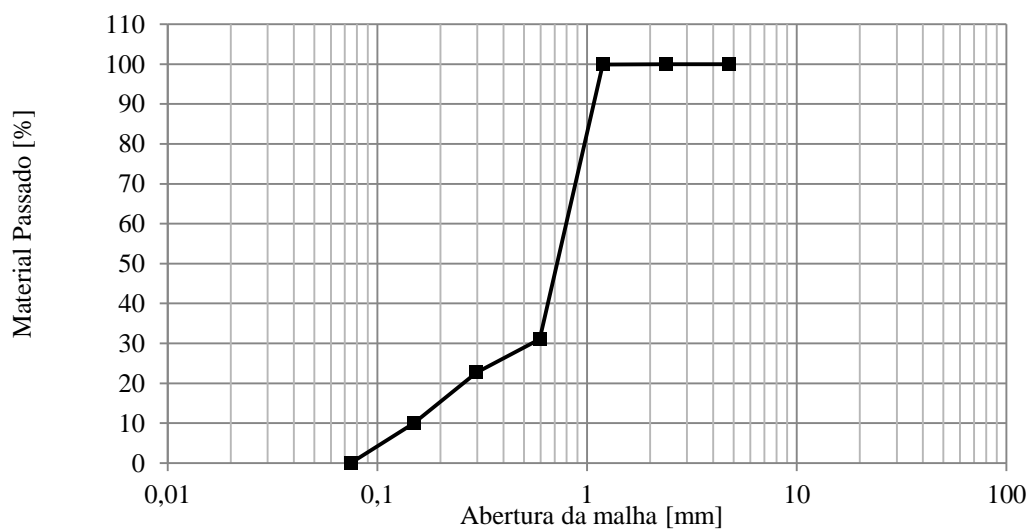


Figura I.1 - Curva granulométrica do agregado normalizado – média das 3 amostras recolhidas na mesma zona

### Análise granulométrica do agregado fino reciclado

Nas tabelas I.3 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de granulometria das três amostras ensaiadas de cada um dos agregados finos reciclados. Apresentam-se também as curvas granulométricas correspondentes a cada uma das amostras de agregado fino reciclado, figura I.2.

Tabela I.3 - Amostra de agregado fino reciclado 1 – média das 3 amostras recolhidas na mesma zona

Peneiro	Malha [mm]	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
3/4"	19,1	2,83	0,14	99,86	0,14
1/2"	12,7	15,97	0,81	99,04	0,96
3/8"	9,52	56,83	2,90	96,14	3,86
n.º4	4,76	174,83	8,92	87,22	12,78
n.º8	2,38	234,53	11,97	75,25	24,75
n.º16	1,19	360,27	18,39	56,86	43,14
n.º30	0,595	424,13	21,65	35,22	64,78
n.º40	0,425	357,50	18,24	16,97	83,03
n.º50	0,297	55,50	2,83	14,14	85,86
n.º70	0,212	118,47	6,05	8,09	91,91
n.º100	0,149	52,20	2,66	5,43	94,57
n.º120	0,125	53,70	2,74	2,69	97,31
n.º170	0,09	32,67	1,67	1,02	98,98
n.º200	0,075	10,37	0,53	0,49	99,51
Refugo	-	9,67	0,49	0,00	100,00
Total		1959,47	100,00	598,42	901,58
Módulo de finura		4,29			
Máxima dimensão do agregado (D) =19,1mm; Mínima dimensão do agregado (d) = 0,075mm					

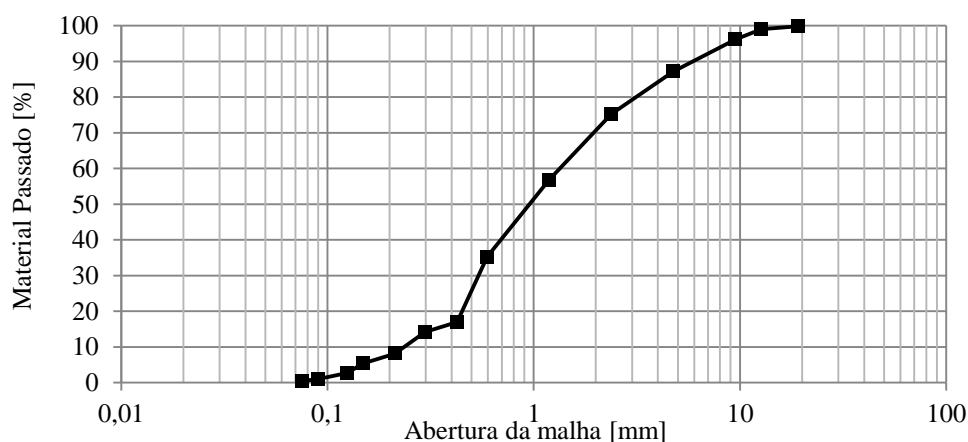


Figura I.2 - Curva granulométrica do agregado fino reciclado 1 – média das 3 amostras recolhidas na mesma zona



Nas tabelas I.4 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de granulometria das três amostras ensaiadas de cada um dos agregados finos reciclados. Apresentam-se também as curvas granulométricas correspondentes a cada uma das amostras de agregado fino reciclado, figura I.3.

Tabela I.4 - Amostra de agregado fino reciclado 2 - média das 3 amostras recolhidas na mesma zona

Peneiro	Malha [mm]	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
3/4''	19,1	0	0,00	100,00	0,00
1/2''	12,7	5,8	0,29	99,71	0,29
3/8''	9,52	56,67	2,84	96,87	3,13
n.º4	4,76	182,83	9,16	87,71	12,29
n.º8	2,38	256,06	12,83	74,88	25,12
n.º16	1,19	349,60	17,52	57,36	42,64
n.º30	0,595	420,26	21,06	36,31	63,69
n.º40	0,425	343,36	17,20	19,10	80,90
n.º50	0,297	63,63	3,19	15,92	84,08
n.º70	0,212	136,37	6,83	9,08	90,92
n.º100	0,149	52,57	2,63	6,45	93,55
n.º120	0,125	47,0	2,35	4,10	95,90
n.º170	0,09	38,17	1,91	2,18	97,82
n.º200	0,075	14,90	0,75	1,44	98,56
Refugo	-	28,67	1,44	0,00	100,00
Total		1995,92	100,00	611,11	888,89
Módulo de finura		4,23			
Máxima dimensão do agregado (D) =12,7mm; Mínima dimensão do agregado (d) = 0,075mm					

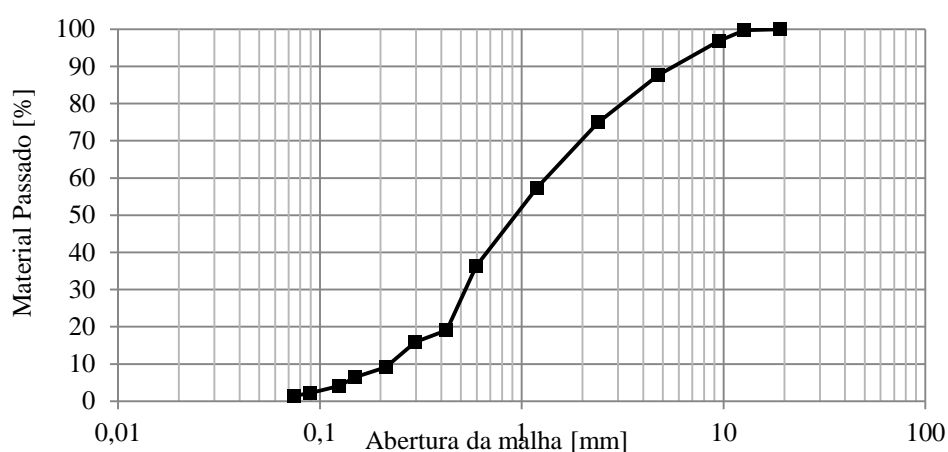


Figura I.3 - Curva granulométrica do agregado fino reciclado 2 – média das 3 amostras recolhidas na mesma zona.

Nas tabelas I.5 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de granulometria das três amostras ensaiadas de cada um dos agregados finos reciclados. Apresentam-se também as curvas granulométricas correspondentes a cada uma das amostras de agregado fino reciclado, figura I.4.

Tabela I.5 - Amostra de agregado fino reciclado 3 – média das 3 amostras recolhidas na mesma zona.

<i>Peneiro</i>	<i>Malha [mm]</i>	<i>Retido</i>		<i>Acumulado [%]</i>	
		<i>Média [g]</i>	<i>[%]</i>	<i>Passado</i>	<i>Retido</i>
3/4''	19,1	0	0	100,00	0
1/2''	12,7	23,23	1,17	98,83	1,17
3/8''	9,52	74,07	3,74	95,09	4,91
n.º4	4,76	187,40	9,45	85,64	14,36
n.º8	2,38	214,70	10,83	74,82	25,18
n.º16	1,19	335,23	16,91	57,91	42,09
n.º30	0,595	406,70	20,51	37,40	62,60
n.º40	0,425	378,40	19,08	18,32	81,68
n.º50	0,297	56,70	2,86	15,46	84,54
n.º70	0,212	131,93	6,65	8,80	91,20
n.º100	0,149	52,50	2,65	6,16	93,84
n.º120	0,125	55,53	2,80	3,36	96,64
n.º170	0,09	41,53	2,09	1,26	98,74
n.º200	0,075	11,10	0,56	0,70	99,30
Refugo	-	13,90	0,70	0,00	100,00
Totais		1982,93	100,00	603,74	896,26
Módulo de finura		4,27			
Máxima dimensão do agregado (D) =12,7mm; Mínima dimensão do agregado (d) =0,075mm					

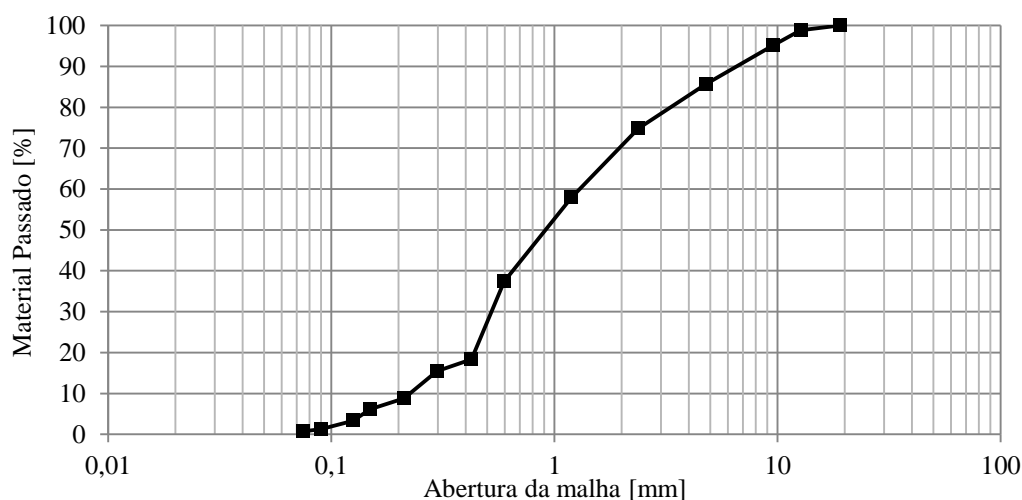


Figura I.4 - Curva granulométrica do agregado fino reciclado 3 – média das 3 amostras recolhidas na mesma zona.

### 3. Caracterização das argamassas frescas

- **Ensaio de consistência por espalhamento**

Na tabela I.6 apresentam-se os resultados obtidos nas quatro medições diametrais realizadas no ensaio de consistência por espalhamento às argamassas estudadas, o ensaio de consistência ao espalhamento realizou-se no dia da realização das amassaduras, dia 19 de Março de 2012.

Tabela I.6 - Valores obtidos no ensaio de consistência por espalhamento das argamassas

<i>Amassadura</i> <sup>1)</sup>	<i>Água [ml]</i>	<i>d<sub>1</sub> [cm]</i>	<i>d<sub>2</sub> [cm]</i>	<i>d<sub>3</sub> [cm]</i>	<i>d<sub>4</sub> [cm]</i>	<i>dmédio [cm]</i>	<i>Espalhamento [%]</i>
0N100R	1010,0	16,3	16,3	16,4	16,4	16,4	63,5
25N75R	860,0	17,4	16,9	16,8	16,7	16,9	69,5
50N50R	935,0	16,1	16,1	16,3	16,2	16,2	61,7
75N25R	940,0	17,4	17,4	17,2	17,5	17,4	73,7
100N0R	930,0	17,3	17,6	17,8	17,6	17,6	75,7

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

### 4. Caracterização das argamassas endurecidas - Características mecânicas e físicas

- **Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico**

Os valores individuais e médios obtidos no ensaio de determinação do módulo de elasticidade pelas argamassas estudadas estão indicados nas tabelas I.7 até I.11 abaixo. Este ensaio realizou-se no dia 18 de Junho de 2012.

Tabela I.7 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pela argamassa 0N100R

<i>Argamassa 1</i> <sup>1)</sup> <i>0N100R</i>	<i>Massa [g]</i>	<i>Edin<sup>individual</sup> [MPa]</i>		<i>Eméd [MPa]</i>	<i>Eméd [MPa]</i>	<i>DP [MPa]</i>
		<i>Edin<sup>1</sup> [MPa]</i>	<i>Edin<sup>2</sup> [MPa]</i>			
Provete 1	425,0	2517,0	2806,0	1330,8	1308,7	75,6
Provete 2	422,2	2574,0	2578,0	1288,0		
Provete 3	423,7	2436,0	2438,0	1218,5		
Provete 4	431,6	2829,0	2864,0	1423,3		
Provete 5	425,9	2563,0	2569,0	1283,0		

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Tabela I.8 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pela argamassa 25N75R

Argamassa 2 <sup>1)</sup> 25N75R	Massa [g]	Edin <sup>individual</sup> [MPa]		Eméd [MPa]	Eméd [MPa]	DP [MPa]
		Edin <sup>1</sup> [MPa]	Edin <sup>2</sup> [MPa]			
Provete 1	429,7	2896,0	2894,0	1447,5	1493,1	67,74
Provete 2	430,0	2919,0	2921,0	1460,0		
Provete 3	430,6	2865,0	2860,0	1431,3		
Provete 4	434,1	3184,0	3179,0	1590,8		
Provete 5	435,1	3074,0	3069,0	1535,8		

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Tabela I.9 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pela argamassa 50N50R

Argamassa 3 <sup>1)</sup> 50N50R	Massa [g]	Edin <sup>individual</sup> [MPa]		Eméd [MPa]	Eméd [MPa]	DP [MPa]
		Edin <sup>1</sup> [MPa]	Edin <sup>2</sup> [MPa]			
Provete 1	458,0	3612,0	3611,0	1805,8	1808,7	59,38
Provete 2	453,2	3533,0	3540,0	1768,3		
Provete 3	452,5	3472,0	3470,0	1735,5		
Provete 4	463,1	3753,0	3663,0	1854,0		
Provete 5	462,7	3762,0	3757,0	1879,8		

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Tabela I.10 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pela argamassa 75N25R

Argamassa 4 <sup>1)</sup> 75N25R	Massa [g]	Edin <sup>individual</sup> [MPa]		Eméd [MPa]	Eméd [MPa]	DP [MPa]
		Edin <sup>1</sup> [MPa]	Edin <sup>2</sup> [MPa]			
Provete 1	454,7	5071,0	5061,0	2533,0	2663,0	124,10
Provete 2	460,1	5074,0	5071,0	2536,3		
Provete 3	465,8	5729,0	5731,0	2865,0		
Provete 4	452,2	5389,0	5392,0	2695,3		
Provete 5	460,0	5288,0	5285,0	2643,3		
Provete 6	453,5	5404,0	5418,0	2705,5		

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Tabela I.11 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pela argamassa 100N0R

Argamassa 5 <sup>1)</sup> 100N0R	Massa [g]	Edin <sup>individual</sup> [MPa]		Eméd [MPa]	Eméd [MPa]	DP [MPa]
		Edin <sup>1</sup> [MPa]	Edin <sup>2</sup> [MPa]			
Provete 1	466,8	5257,0	5262,0	2629,8	2587,4	89,00
Provete 2	456,1	5094,0	5097,0	2547,8		
Provete 3	470,8	5211,0	5204,0	2603,8		
Provete 4	468,3	5039,0	5028,0	2516,8		
Provete 5	485,6	5783,0	5157,0	2735,0		
Provete 6	470,0	4980,0	4986,0	2491,5		

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

- **Resistência à tracção por flexão e resistência à compressão**

Nas tabelas I.12 e I.13 apresentam-se os valores obtidos nos ensaios de resistência à tracção por flexão e resistência à compressão para os provetes de argamassa estudados realizados no dia 18 de Junho de 2012.

Tabela I.12 - Resultados do ensaio de resistência à tracção por flexão

<i>Argamassa</i> <sup>1)</sup>	<i>Proвете</i>	<i>Ff [N]</i>	<i>Rf [MPa]</i>	<i>Rf méd [MPa]</i>	<i>DP [MPa]</i>
Argamassa 1 - 0N100R	1	175,68	0,41	0,55	0.10
	2	282,01	0,66		
	3	216,00	0,51		
	4	247,90	0,58		
	5	261,57	0,61		
Argamassa 2 - 25N75R	1	196,93	0,46	0,49	0.07
	2	171,16	0,40		
	3	196,32	0,46		
	4	250,07	0,59		
	5	227,33	0,53		
Argamassa 3 - 50N50R	1	225,12	0,53	0,55	0.07
	2	221,74	0,52		
	3	239,73	0,56		
	4	199,41	0,47		
	5	280,06	0,66		
Argamassa 4 - 75N25R	1	232,15	0,54	0,52	0.09
	2	202,57	0,47		
	3	279,46	0,65		
	4	241,69	0,57		
	5	167,06	0,39		
	6	206,71	0,48		
Argamassa 5 - 100N0R	1	172,85	0,41	0,42	0.02
	2	181,92	0,43		
	3	180,97	0,42		
	4	168,34	0,39		
	5	182,26	0,43		
	6	185,98	0,44		

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Tabela I.13 - Resultado do ensaio de resistência à compressão

<i>Provetes</i> <sup>1)</sup>		<i>F<sub>c</sub></i> [N]	<i>R<sub>c</sub></i> [MPa]	<i>R<sub>cméd</sub></i> [MPa]	<i>DP</i> [MPa]
Argamassa 1 0N100R	1	3397,88	2,12	1,74	0.33
	2	2516,91	1,57		
	3	2434,95	1,52		
Argamassa 2 25N75R	1	2823,10	1,76	1,71	0.05
	2	2682,49	1,68		
	3	2701,58	1,69		
Argamassa 3 50N50R	1	2614,01	1,63	1,63	0.06
	2	2692,31	1,68		
	3	2501,47	1,56		
Argamassa 4 75N25R	1	2557,88	1,60	1,54	0.05
	2	2453,48	1,53		
	3	2397,63	1,50		
Argamassa 5 100N0R	1	1728,55	1,08	0,92	0.24
	2	1651,65	1,03		
	3	1034,21	0,65		

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

#### • Aderência ao suporte

Na tabela I.14 apresentam-se os valores obtidos no ensaio de aderência ao suporte pelos provetes de argamassa. O ensaio de aderência ao suporte das argamassas realizou-se dia 20 de Junho de 2012. A argamassa 1 – 0N100R não chegou a ser ensaiada com o dinamómetro, deu-se a rotura das pastilhas enquanto o processo de corte do reboco.

Tabela I.14 - Resultados do ensaio de aderência ao suporte das argamassas estudadas

<i>Pastilha de argamassa</i> <sup>1)</sup>		<i>Força</i> [N]	<i>S<sub>i</sub></i> [mm <sup>2</sup> ]	<i>S</i> [mm <sup>2</sup> ]	<i>σ</i> [MPa]	<i>σ'</i> [MPa]	<i>Tipologia de Rotura</i>	<i>σ<sub>méd</sub></i> [MPa]	<i>DP</i> [MPa]
Argamassa 2 25N75R	1	0,21	2401,47	1963,00	0,11	0,09	Adesiva	0,09	0,01
	2	0,21	2535,18	1963,00	0,11	0,08			
	3	0,25	2349,02	1963,00	0,13	0,11	Coesiva		
Argamassa 3 50N50R	1	0,12	2352,85	1963,00	0,06	0,05		0,08	0,04
	2	0,13	2455,83	1963,00	0,07	0,05			
	3	0,32	2500,00	1963,00	0,16	0,13			
Argamassa 4 75N25R	1	0,22	2304,37	1963,00	0,11	0,10	Adesiva	0,09	0,02
	2	0,19	2538,69	1963,00	0,10	0,07			
	3	0,25	2370,52	1963,00	0,13	0,11			
Argamassa 5 100N0R	1	0,26	2711,25	1963,00	0,13	0,10		0,10	0,01
	2	0,26	2456,67	1963,00	0,13	0,11			
	3	0,19	2243,74	1963,00	0,10	0,08			

- **Absorção de água por capilaridade**

Nas tabelas I.15, I.16 e I.17 apresentam-se registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade, os resultados dos coeficientes de absorção de água por capilaridade e dos valores assintótico obtidos pelos provetes de argamassa de cal aérea. Este ensaio iniciou-se no dia 27 de Junho de 2012.

Tabela I.15 - Registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade dos provetes da argamassa 0N100R e argamassa 25N75R.

<i>Data</i>	<i>Medições (g)</i>	<i>0N100R</i>			<i>25N75R</i>		
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
27-06-2012	Mo(g)	215,1	198,5	181,9	201,7	224,2	218,9
	0min	215,1	198,5	181,9	201,7	224,2	218,9
	5min.	219,9	203,4	186,3	206,3	228,8	223,4
	15min.	222,9	206,4	189,3	209,0	231,7	226,3
	30min.	225,9	209,4	192,3	211,7	234,5	229,1
	60min.	230,1	213,8	196,5	215,6	238,5	233,1
	3h.	240,5	224,2	207,2	225,3	248,2	242,7
	6h.	249,3	231,1	210,9	228,9	254,8	249,0
28-06-2012	24h.	250,0	231,8	211,4	229,5	255,5	249,5
29-06-2012	24h.	250,6	232,2	211,9	229,9	255,9	250,1
30-06-2012	24h..	252,0	233,6	213,0	230,8	256,8	251,0
02-07-2012	24h.	253,1	234,5	213,9	232,2	258,7	252,3
03-07-2012	24h.	253,3	234,7	214,1	232,6	259,2	252,9
04-07-2012	24h.	253,3	234,8	214,2	233,0	259,5	253,3
05-07-2012	24h.	253,4	235,0	214,3	233,2	259,8	253,6
06-07-2012	24h.	253,5	235,0	214,4	233,4	260,0	253,8
07-07-2012	24h.	253,8	235,1	214,5	233,6	260,1	254,0

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Tabela I.16 - Registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade dos provetes da argamassa 50N50R, argamassa 75N25R e argamassa 100N0R.

Data	Medições [g]	50N50R			75N25R			100N0R		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
27-06-2012	M <sub>0</sub>	221,1	231,5	240,5	249,9	234,5	249,0	235,0	245,8	244,3
	0min	221,1	231,5	240,5	249,9	234,5	249,0	235,0	245,8	244,3
	5min.	225,8	235,7	245,3	254,9	240,9	253,6	240,9	252,1	251,8
	15min.	228,2	238,0	247,9	257,1	246,2	255,7	244,3	255,5	255,5
	30min.	230,5	240,3	250,5	259,1	247,2	257,8	247,5	258,9	259,0
	60min.	233,8	243,6	253,9	261,8	248,2	261,9	253,4	265,1	264,7
	3h.	241,5	251,4	261,9	268,0	253,1	267,1	254,8	267,0	265,2
	6h.	244,7	256,5	267,3	272,1	255,6	270,9	254,9	267,1	265,3
28-06-2012	24h.	245,4	257,3	268,0	273,3	256,4	272,0	255,1	267,5	265,6
29-06-2012	48h.	245,8	257,8	268,5	274,0	257,0	272,6	255,6	267,9	266,1
30-06-2012	72h.	246,4	258,3	268,9	274,5	257,5	273,2	256,0	268,4	266,5
02-07-2012	96h.	247,0	259,0	269,7	274,9	257,9	273,6	256,2	268,7	266,7
03-07-2012	120h.	247,5	259,5	270,4	275,2	258,1	273,8	256,4	268,8	267,0
04-07-2012	144h.	248,1	260,1	271,0	275,4	258,3	274,0	256,6	269,0	267,1
05-07-2012	168h.	248,5	260,6	271,6	275,5	258,4	274,3	256,7	269,2	267,2
06-07-2012	192h.	249,2	261,1	272,2	275,7	258,7	274,4	256,8	269,3	267,3
07-07-2012	216h.	249,5	261,6	272,6	275,9	258,8	274,6	256,9	269,4	267,5

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Tabela I.17 - Coeficiente de absorção e valor assintótico dos provetes de argamassa

Provetes de argamassa <sup>1)</sup>		Cca [Kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]	Cca méd. [Kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]	DP [Kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]	VA [Kg/m <sup>2</sup> ]	VA méd. [Kg/m <sup>2</sup> ]	DP [Kg/m <sup>2</sup> ]
Argamassa1 0N100R	1	9,14	9,17	0,09	24,16	22,46	1,93
	2	9,27			22,85		
	3	9,11			20,36		
Argamassa2 25N75R	1	8,51	8,59	0,08	19,90	21,44	1,36
	2	8,67			22,47		
	3	8,59			21,96		
Argamassa3 50N50R	1	7,36	7,41	0,28	17,77	18,87	1,13
	2	7,17			18,79		
	3	7,72			20,04		
Argamassa4 75N25R	1	7,43	10,00	3,94	16,28	15,81	0,58
	2	14,53			15,15		
	3	8,03			15,99		
Argamassa5 100N0R	1	11,50	12,11	0,63	13,65	14,28	0,56
	2	12,07			14,73		
	3	12,76			14,46		



- **Secagem**

Nas tabelas I.18 e I.23 apresentam-se os registos das massas durante o ensaio de secagem. Este ensaio teve início quando o ensaio de absorção por capilaridade terminou, ou seja dia 9 de Julho de 2012.

Tabela I.18 - Registos das massas durante o ensaio de secagem da argamassa ON100R, 25N75R e 50N50R

<i>Data</i>	<i>Medições</i>	<i>ON100R</i>			<i>ON100R</i>			<i>50N50R</i>		
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
	Provete seco	215,13	198,52	181,92	201,74	224,18	218,86	221,10	231,49	240,55
09-07-2012	0min	253,83	235,20	214,69	233,93	260,49	254,31	250,20	262,26	273,41
	15min.	253,13	234,55	214,10	233,45	259,99	253,69	249,74	261,80	272,78
	30min.	253,08	234,33	213,80	233,21	259,68	253,32	249,48	261,44	272,43
	45min.	252,75	233,61	213,47	232,93	259,36	252,96	249,19	261,10	272,05
	60min.	252,45	233,69	213,16	232,67	259,04	252,61	248,91	260,77	271,70
	2h.	251,33	232,59	212,06	231,74	257,92	251,39	248,02	259,66	270,45
	3h.	250,06	231,59	211,04	230,97	256,99	250,33	247,31	258,72	269,36
	4h.	249,06	230,58	210,00	230,28	255,97	249,20	246,61	257,67	268,16
	5h.	247,93	229,43	208,76	229,38	254,77	247,91	245,69	256,46	266,83
	6h.	247,24	228,66	207,97	228,79	254,05	247,07	245,07	255,68	265,95
10-07-2012	24h.	227,73	209,20	189,73	213,16	235,01	227,23	231,74	237,71	246,34
11-07-2012	24h.	222,84	205,85	187,25	208,56	230,90	224,45	224,55	235,50	244,44
12-07-2012	24h.	218,23	201,90	184,57	203,71	226,52	221,27	222,64	232,95	242,08
13-07-2012	24h.	217,63	201,32	184,14	203,25	226,06	220,85	222,30	232,65	241,05
16-07-2012	24h.	217,26	200,89	183,91	203,02	225,82	220,61	222,16	232,54	241,76
17-07-2012	24h.	217,26	200,89	183,91	203,01	225,82	220,61	222,16	232,54	241,76

<sup>1)</sup> xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Tabela I.19 - Registos das massas durante o ensaio de secagem da argamassa 75N25R e 100N0R

<i>Data</i>	<i>Medições</i>	<i>75N25R</i>			<i>100N0R</i>		
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
	Provete seco	249,91	234,53	249,01	235,02	245,83	244,32
09-07-2012	0min	276,22	259,13	274,86	257,06	269,47	267,56
	15min.	275,93	258,88	274,35	256,64	269,05	267,10
	30min.	275,69	258,62	273,99	256,42	268,87	266,77
	45min.	275,44	258,36	273,36	256,21	268,58	266,43
	60min.	275,20	258,18	273,05	255,97	268,34	266,18
	2horas	274,36	257,28	271,82	255,22	267,42	265,07
	3horas	273,66	256,74	270,75	254,51	266,74	264,30
	4horas	272,94	255,86	269,58	253,83	265,96	263,30
	5horas	272,08	254,94	268,24	252,95	265,04	262,20
	6horas	271,56	254,51	267,40	252,38	264,52	261,54
10-07-2012	24horas	257,43	240,22	253,01	239,37	250,70	246,98
11-07-2012	24horas	254,80	238,24	251,53	237,40	248,54	245,99
12-07-2012	24horas	251,44	235,84	249,82	235,25	246,12	244,58
13-07-2012	24horas	251,11	235,57	249,62	235,29	246,15	244,63
16-07-2012	24horas	250,96	235,46	249,54	235,32	246,22	244,68
17-07-2012	24horas	250,94	235,45	249,54	235,30	246,20	244,67

Tabela I.20 - Teor em água durante o ensaio de secagem das argamassas 0N100R, 25N75R e 50N50R

<i>Tempo [h]</i>	<i>0N100R</i>				<i>25N75R</i>				<i>50N50R</i>			
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Média</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Média</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Média</i>
0	17,99	18,48	18,01	18,16	15,96	16,20	16,20	16,12	13,16	13,29	13,66	13,37
0,3	17,67	18,15	17,68	17,83	15,72	15,97	15,91	15,87	12,95	13,09	13,40	13,15
0,5	17,64	18,04	17,52	17,74	15,60	15,84	15,74	15,73	12,83	12,94	13,25	13,01
0,8	17,49	17,68	17,34	17,50	15,46	15,69	15,58	15,58	12,71	12,79	13,10	12,86
1	17,35	17,72	17,17	17,41	15,33	15,55	15,42	15,44	12,58	12,65	12,95	12,73
2	16,83	17,16	16,56	16,85	14,87	15,05	14,86	14,93	12,18	12,17	12,43	12,26
3	16,24	16,66	16,01	16,30	14,49	14,64	14,38	14,50	11,86	11,76	11,98	11,87
4	15,77	16,15	15,43	15,78	14,15	14,18	13,86	14,07	11,54	11,31	11,48	11,44
5	15,25	15,57	14,75	15,19	13,70	13,65	13,27	13,54	11,12	10,78	10,93	10,94
6	14,93	15,18	14,31	14,81	13,41	13,33	12,89	13,21	10,84	10,45	10,56	10,62
24	5,86	5,38	4,29	5,18	5,66	4,83	3,82	4,77	4,81	2,69	2,41	3,30
48	3,58	3,69	2,93	3,40	3,38	3,00	2,55	2,98	1,56	1,73	1,62	1,64
72	1,44	1,71	1,45	1,53	0,98	1,05	1,10	1,04	0,69	0,63	0,64	0,65
96	1,16	1,41	1,22	1,27	0,75	0,84	0,91	0,83	0,54	0,50	0,21	0,42
120	0,99	1,20	1,09	1,09	0,63	0,73	0,80	0,72	0,48	0,45	0,50	0,48
144	0,99	1,20	1,09	1,09	0,63	0,73	0,80	0,72	0,48	0,45	0,50	0,48

Tabela I.21 - Registos do teor em água durante o ensaio de secagem das argamassas 75N25R e 100N0R

<i>Tempo [h]</i>	<i>75N25R</i>				<i>100N0R</i>			
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Média</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Média</i>
0	10,53	10,49	10,38	10,47	9,37	9,62	9,51	9,50
0,3	10,41	10,38	10,17	10,32	9,20	9,44	9,33	9,32
0,5	10,32	10,27	10,03	10,21	9,10	9,37	9,19	9,22
0,8	10,22	10,16	9,78	10,05	9,01	9,26	9,05	9,11
1	10,12	10,08	9,65	9,95	8,91	9,16	8,95	9,01
2	9,78	9,70	9,16	9,55	8,59	8,78	8,49	8,62
3	9,51	9,47	8,73	9,24	8,29	8,51	8,18	8,32
4	9,22	9,09	8,26	8,86	8,00	8,19	7,77	7,99
5	8,87	8,70	7,72	8,43	7,63	7,81	7,32	7,59
6	8,66	8,52	7,39	8,19	7,39	7,60	7,05	7,34
24	3,01	2,43	1,60	2,35	1,85	1,98	1,09	1,64
48	1,96	1,58	1,01	1,52	1,01	1,10	0,68	0,93
72	0,61	0,56	0,32	0,50	0,09	0,12	0,10	0,11
96	0,48	0,44	0,25	0,39	0,11	0,13	0,13	0,12
120	0,42	0,40	0,21	0,34	0,13	0,16	0,14	0,14
144	0,41	0,39	0,21	0,34	0,12	0,15	0,14	0,14

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Tabela I.22 - Resultados do índice de secagem dos provetes de argamassa 0N100R, 25N75R e 50N50R

<i>0N100R</i>			<i>25N75R</i>			<i>50N50R</i>		
<i>Índice de Secagem</i>	<i>IS med.</i>	<i>DP</i>	<i>Índice de Secagem</i>	<i>IS med.</i>	<i>DP</i>	<i>Índice de Secagem</i>	<i>IS med.</i>	<i>DP</i>
0,002	0,013	0,018	0,002	0,011	0,016	0,001	0,008	0,012
0,002			0,002			0,001		
0,002			0,001			0,001		
0,002			0,001			0,001		
0,007			0,006			0,005		
0,006			0,006			0,005		
0,006			0,005			0,004		
0,006			0,005			0,004		
0,006			0,005			0,004		
0,069			0,062			0,048		
0,039			0,036			0,023		
0,023			0,018			0,011		
0,013			0,009			0,005		
0,011			0,007			0,004		
0,010			0,007			0,004		

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Tabela I.23 - Resultados do índice de secagem dos provetes de argamassa 75N25R e 100N0R

75N25R			100N0R		
Índice de Secagem	IS med.	DP	Índice de Secagem	IS med.	DP
0,001	0,006	0,009	0,001	0,005	0,008
0,001			0,001		
0,001			0,001		
0,001			0,001		
0,004			0,003		
0,004			0,003		
0,003			0,003		
0,003			0,003		
0,003			0,003		
0,036			0,031		
0,018			0,012		
0,009			0,005		
0,004			0,001		
0,003			0,001		
0,003			0,001		

• **Massa volúmica real, Massa volúmica aparente e porosidade aberta**

Nas tabelas I.24, I.25 e I.26 indicam-se os valores da massa volúmica real (MVR) massa volúmica aparente (MVA) e porosidade aberta (PA) aos 90 dias

Tabela I.24 - Massa volúmica real dos proves de argamassa estudados

Provetes de argamassa <sup>1)</sup>		$M_0$ [g]	$M_1$ [g]	$M_2$ [g]	MVR [Kg/m <sup>3</sup> ]	MVRmed. [Kg/m <sup>3</sup> ]	DP [Kg/m <sup>3</sup> ]
Argamassa1 0N100R	1	58,02	33,94	67,98	2409,11	2418,38	8,26
	2	75,25	44,22	87,68	2424,98		
	3	76,70	45,02	89,55	2421,04		
Argamassa2 25N75R	1	68,97	39,96	78,84	2377,20	2378,26	1,65
	2	52,77	30,57	60,58	2377,43		
	3	58,53	33,94	66,71	2380,17		
Argamassa3 50N50R	1	67,22	38,37	74,91	2329,75	2328,96	2,11
	2	60,78	34,66	67,99	2326,57		
	3	52,00	29,69	57,95	2330,57		
Argamassa4 75N25R	1	50,58	28,40	55,70	2280,46	2181,78	171,65
	2	65,39	36,73	71,82	2281,29		
	3	66,80	33,12	65,09	1983,58		
Argamassa5 100N0R	1	66,80	37,50	72,98	2280,16	2279,88	0,96
	2	52,29	29,34	56,81	2278,81		
	3	57,14	32,09	62,23	2280,66		

Tabela I.25 - Massa volúmica aparente dos proves de argamassa estudados

<i>Provetes de argamassa</i> <sup>1)</sup>		<i>M<sub>0</sub> [g]</i>	<i>M<sub>1</sub> [g]</i>	<i>M<sub>2</sub> [g]</i>	<i>MVA [Kg/m<sup>3</sup>]</i>	<i>MVAmed. [Kg/m<sup>3</sup>]</i>	<i>DP [Kg/m<sup>3</sup>]</i>
Argamassa1 0N100R	1	58,02	33,94	67,98	1704,59	1719,55	13,75
	2	75,25	44,22	87,68	1731,64		
	3	76,70	45,02	89,55	1722,42		
Argamassa2 25N75R	1	68,97	39,96	78,84	1774,02	1772,73	13,82
	2	52,77	30,57	60,58	1758,31		
	3	58,53	33,94	66,71	1785,85		
Argamassa3 50N50R	1	67,22	38,37	74,91	1839,32	1834,22	9,16
	2	60,78	34,66	67,99	1823,65		
	3	52,00	29,69	57,95	1839,68		
Argamassa4 75N25R	1	50,58	28,40	55,70	1852,74	1935,11	133,53
	2	65,39	36,73	71,82	1863,42		
	3	66,80	33,12	65,09	2089,17		
Argamassa5 100N0R	1	66,80	37,50	72,98	1882,82	1894,01	10,49
	2	52,29	29,34	56,81	1903,63		
	3	57,14	32,09	62,23	1895,57		

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Tabela I.26 - Porosidade aberta dos provetes de argamassa estudados

<i>Provetes de argamassa</i> <sup>1)</sup>		<i>M<sub>0</sub> [g]</i>	<i>M<sub>1</sub> [g]</i>	<i>M<sub>2</sub> [g]</i>	<i>PA [%]</i>	<i>PA med. [%]</i>	<i>DP [%]</i>
Argamassa1 0N100R	1	58,02	33,94	67,98	29,24	28,90	0,33
	2	75,25	44,22	87,68	28,59		
	3	76,70	45,02	89,55	28,86		
Argamassa2 25N75R	1	68,97	39,96	78,84	25,37	25,46	0,54
	2	52,77	30,57	60,58	26,04		
	3	58,53	33,94	66,71	24,97		
Argamassa3 50N50R	1	67,22	38,37	74,91	21,05	21,24	0,32
	2	60,78	34,66	67,99	21,62		
	3	52,00	29,69	57,95	21,06		
Argamassa4 75N25R	1	50,58	28,40	55,70	18,76	10,58	13,78
	2	65,39	36,73	71,82	18,32		
	3	66,80	33,12	65,09	-5,32		
Argamassa5 100N0R	1	66,80	37,50	72,98	17,43	16,92	0,48
	2	52,29	29,34	56,81	16,46		
	3	57,14	32,09	62,23	16,89		

<sup>1)</sup>xNyR: argamassa de cal aérea com x% de agregado normalizado e y% agregado fino reciclado

Este ensaio teve início dia 26 de Junho de 2012 e acabou dia 28 de Junho de 2012.

• **Porosimetria de mercúrio**

Nas tabelas I.27 e I.31 apresentam-se os registos dos valores de ensaio de porosimetria de mercúrio.

Tabela I. 27 - Valores de ensaio de porosimetria de mercúrio para argamassa 0N100R

<i>0N100R</i>					
<i>Diâmetro do poro [μm]</i>	<i>Pressão de intrusão [MPa]</i>	<i>Incremental Intrusion [ml/g]</i>	<i>Log Differential Intrusion [ml/g]</i>	<i>Cumulative Intrusion [ml/g]</i>	<i>Cumulative Pore Area [m²/g]</i>
425,42155	0,00349	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
108,80863	0,01366	0,00492	0,00831	0,00492	0,00007
72,42732	0,02052	0,00126	0,00713	0,00618	0,00013
54,15577	0,02744	0,00143	0,01130	0,00761	0,00022
43,30569	0,03432	0,00157	0,01613	0,00917	0,00035
36,08856	0,04118	0,00269	0,03395	0,01186	0,00062
30,91405	0,04807	0,00209	0,03113	0,01395	0,00087
27,06257	0,05491	0,00473	0,08177	0,01868	0,00152
24,05532	0,06178	0,00443	0,08668	0,02311	0,00221
21,63532	0,06869	0,00475	0,10322	0,02787	0,00305
17,27355	0,08603	0,01165	0,11919	0,03952	0,00544
14,40115	0,10320	0,00665	0,08421	0,04617	0,00712
12,34728	0,12036	0,00455	0,06802	0,05072	0,00848
10,80399	0,13755	0,00316	0,05449	0,05388	0,00957
8,63620	0,17208	0,00481	0,04944	0,05869	0,01155
7,19563	0,20653	0,00335	0,04231	0,06204	0,01325
5,62639	0,26414	0,00228	0,02131	0,06432	0,01467
4,46499	0,33284	0,00251	0,02502	0,06683	0,01666
3,73558	0,39783	0,00225	0,02900	0,06908	0,01885
3,17868	0,46753	0,00180	0,02562	0,07087	0,02093
2,77008	0,53649	0,00156	0,02612	0,07243	0,02303
2,44985	0,60662	0,00153	0,02866	0,07396	0,02537
2,18587	0,67988	0,00128	0,02587	0,07524	0,02758
1,74786	0,85026	0,00223	0,02292	0,07747	0,03211
1,46101	1,01719	0,00220	0,02830	0,07967	0,03760
1,24223	1,19633	0,00211	0,02993	0,08178	0,04384
1,08909	1,36456	0,00193	0,03386	0,08372	0,05048
0,96762	1,53586	0,00207	0,04034	0,08579	0,05854
0,86864	1,71088	0,00213	0,04545	0,08792	0,06782
0,79157	1,87745	0,00245	0,06077	0,09037	0,07964
0,72326	2,05476	0,00270	0,06901	0,09307	0,09392
0,66666	2,22920	0,00298	0,08419	0,09605	0,11107
0,61605	2,41237	0,00345	0,10061	0,09950	0,13259
0,57825	2,57007	0,00344	0,12496	0,10294	0,15561
0,53964	2,75394	0,00392	0,13048	0,10686	0,18363
0,50971	2,91565	0,00374	0,15105	0,11060	0,21217

<i>0N100R</i>					
<i>Diâmetro do poro [µm]</i>	<i>Pressão de intrusão [MPa]</i>	<i>Incremental Intrusion [ml/g]</i>	<i>Log Differential Intrusion [ml/g]</i>	<i>Cumulative Intrusion [ml/g]</i>	<i>Cumulative Pore Area [m²/g]</i>
0,48006	3,09570	0,00385	0,14780	0,11445	0,24326
0,45484	3,26735	0,00376	0,16039	0,11820	0,27542
0,43336	3,42929	0,00347	0,16500	0,12167	0,30664
0,39273	3,78408	0,00684	0,16000	0,12851	0,37289
0,36019	4,12599	0,00575	0,15317	0,13427	0,43403
0,33145	4,48373	0,00476	0,13175	0,13902	0,48906
0,30850	4,81734	0,00406	0,13041	0,14309	0,53988
0,28790	5,16204	0,00324	0,10791	0,14633	0,58332
0,26998	5,50453	0,00283	0,10142	0,14916	0,62390
0,25406	5,84941	0,00247	0,09366	0,15163	0,66163
0,24030	6,18449	0,00204	0,08437	0,15367	0,69466
0,22687	6,55069	0,00191	0,07664	0,15558	0,72745
0,21571	6,88934	0,00161	0,07340	0,15719	0,75649
0,17270	8,60547	0,00626	0,06479	0,16345	0,88539
0,14385	10,33104	0,00423	0,05326	0,16768	0,99222
0,12323	12,05945	0,00323	0,04812	0,17091	1,08906
0,10779	13,78719	0,00264	0,04541	0,17355	1,18050
0,09584	15,50601	0,00221	0,04334	0,17576	1,26738
0,08603	17,27515	0,00190	0,04043	0,17766	1,35083
0,07844	18,94636	0,00138	0,03448	0,17904	1,41809
0,07198	20,64723	0,00140	0,03747	0,18044	1,49249
0,06639	22,38471	0,00125	0,03574	0,18169	1,56499
0,06170	24,08796	0,00105	0,03311	0,18275	1,63085
0,05751	25,84024	0,00099	0,03254	0,18374	1,69744
0,05394	27,55160	0,00085	0,03052	0,18459	1,75846
0,05074	29,29175	0,00079	0,02980	0,18538	1,81903
0,04795	30,99020	0,00069	0,02829	0,18608	1,87517
0,04543	32,71135	0,00063	0,02669	0,18670	1,92885
0,04313	34,45690	0,00059	0,02604	0,18729	1,98196
0,03921	37,89946	0,00102	0,02475	0,18831	2,08142
0,03596	41,32969	0,00084	0,02242	0,18916	2,17122
0,03319	44,77114	0,00069	0,01985	0,18985	2,25100
0,03082	48,22421	0,00066	0,02040	0,19051	2,33326
0,02876	51,66766	0,00061	0,02049	0,19112	2,41567
0,02696	55,11588	0,00050	0,01770	0,19162	2,48696
0,02538	58,56494	0,00046	0,01760	0,19208	2,55787
0,02397	62,01074	0,00040	0,01631	0,19248	2,62351
0,02271	65,45303	0,00036	0,01551	0,19285	2,68588
0,02157	68,91159	0,00033	0,01461	0,19318	2,74491
0,01725	86,14964	0,00122	0,01263	0,19440	2,99734
0,01437	103,38675	0,00084	0,01066	0,19524	3,21089

<b>0N100R</b>					
<b><i>Diâmetro do poro [μm]</i></b>	<b><i>Pressão de intrusão [MPa]</i></b>	<b><i>Incremental Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Log Differential Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Cumulative Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Cumulative Pore Area [m²/g]</i></b>
0,01232	120,61711	0,00053	0,00792	0,19577	3,36972
0,01078	137,84744	0,00016	0,00271	0,19593	3,42405
0,00958	155,09018	0,00017	0,00328	0,19610	3,48994
0,00862	172,33708	0,00000	0,00000	0,19610	3,48994
0,00784	189,55017	0,00012	0,00289	0,19622	3,54795
0,00719	206,78872	0,00001	0,00000	0,19622	3,55099

Tabela I. 28 - Valores de ensaio de porosimetria de mercúrio para argamassa 25N75R

<b>25N75R</b>					
<b><i>Diâmetro do poro [μm]</i></b>	<b><i>Pressão de intrusão [MPa]</i></b>	<b><i>Incremental Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Log Differential Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Cumulative Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Cumulative Pore Area [m²/g]</i></b>
426,01080	0,00349	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
108,90194	0,01365	0,00380	0,00641	0,00380	0,00006
72,34508	0,02054	0,00089	0,00503	0,00469	0,00010
54,15355	0,02744	0,00147	0,01167	0,00616	0,00019
43,31923	0,03431	0,00180	0,01853	0,00796	0,00034
36,06154	0,04121	0,00226	0,02836	0,01021	0,00056
30,91690	0,04807	0,00256	0,03824	0,01277	0,00087
27,05609	0,05493	0,00509	0,08789	0,01786	0,00157
24,05078	0,06179	0,00637	0,12467	0,02424	0,00257
21,63075	0,06870	0,00581	0,12615	0,03005	0,00359
17,31048	0,08585	0,01012	0,10460	0,04017	0,00567
14,39180	0,10326	0,00671	0,08372	0,04688	0,00736
12,34300	0,12040	0,00431	0,06465	0,05119	0,00865
10,80226	0,13758	0,00298	0,05141	0,05417	0,00968
8,63285	0,17215	0,00420	0,04312	0,05837	0,01141
7,19601	0,20652	0,00277	0,03506	0,06114	0,01281
5,64629	0,26320	0,00216	0,02055	0,06331	0,01416
4,49774	0,33042	0,00160	0,01623	0,06491	0,01542
3,73362	0,39804	0,00124	0,01537	0,06615	0,01663
3,16133	0,47010	0,00108	0,01493	0,06723	0,01788
2,75967	0,53852	0,00093	0,01572	0,06816	0,01914
2,47160	0,60128	0,00071	0,01482	0,06887	0,02022
2,20489	0,67402	0,00071	0,01437	0,06958	0,02144
1,76157	0,84364	0,00149	0,01524	0,07107	0,02444
1,45022	1,02476	0,00162	0,01923	0,07269	0,02848
1,24618	1,19255	0,00171	0,02593	0,07440	0,03355
1,08986	1,36359	0,00168	0,02890	0,07608	0,03931
0,96581	1,53873	0,00180	0,03428	0,07788	0,04631
0,86659	1,71493	0,00203	0,04303	0,07991	0,05516



<i>25N75R</i>					
<i>Diâmetro do poro [µm]</i>	<i>Pressão de intrusão [MPa]</i>	<i>Incremental Intrusion [ml/g]</i>	<i>Log Differential Intrusion [ml/g]</i>	<i>Cumulative Intrusion [ml/g]</i>	<i>Cumulative Pore Area [m²/g]</i>
0,78793	1,88611	0,00229	0,05538	0,08219	0,06622
0,72202	2,05829	0,00279	0,07363	0,08499	0,08102
0,66247	2,24331	0,00342	0,09142	0,08841	0,10077
0,62116	2,39252	0,00308	0,11000	0,09148	0,11994
0,57599	2,58014	0,00407	0,12403	0,09555	0,14712
0,54162	2,74388	0,00336	0,12570	0,09891	0,17116
0,50794	2,92579	0,00352	0,12630	0,10243	0,19800
0,48017	3,09499	0,00324	0,13257	0,10567	0,22420
0,45634	3,25663	0,00289	0,13062	0,10855	0,24887
0,43249	3,43619	0,00268	0,11502	0,11123	0,27300
0,39290	3,78250	0,00460	0,11033	0,11583	0,31760
0,35892	4,14057	0,00383	0,09753	0,11967	0,35836
0,33153	4,48267	0,00314	0,09099	0,12280	0,39471
0,30848	4,81763	0,00250	0,07999	0,12531	0,42601
0,28787	5,16242	0,00218	0,07257	0,12748	0,45523
0,26972	5,51000	0,00187	0,06617	0,12936	0,48210
0,25393	5,85253	0,00156	0,05970	0,13092	0,50599
0,23947	6,20600	0,00138	0,05407	0,13230	0,52831
0,22713	6,54306	0,00119	0,05164	0,13348	0,54865
0,21635	6,86906	0,00106	0,05025	0,13455	0,56779
0,17243	8,61886	0,00404	0,04101	0,13859	0,65097
0,14392	10,32629	0,00275	0,03505	0,14134	0,72054
0,12329	12,05406	0,00212	0,03159	0,14346	0,78409
0,10788	13,77529	0,00175	0,03014	0,14521	0,84456
0,09587	15,50114	0,00148	0,02892	0,14669	0,90277
0,08611	17,25829	0,00141	0,03031	0,14810	0,96490
0,07845	18,94396	0,00088	0,02171	0,14898	1,00763
0,07198	20,64566	0,00096	0,02582	0,14995	1,05893
0,06643	22,37068	0,00089	0,02549	0,15084	1,11027
0,06166	24,10283	0,00076	0,02354	0,15160	1,15788
0,05757	25,81336	0,00065	0,02191	0,15225	1,20166
0,05392	27,56381	0,00058	0,02025	0,15283	1,24306
0,05076	29,27778	0,00054	0,02045	0,15336	1,28401
0,04795	30,99109	0,00048	0,01962	0,15385	1,32327
0,04543	32,70960	0,00043	0,01820	0,15428	1,35982
0,04312	34,46573	0,00036	0,01568	0,15463	1,39200
0,03922	37,88916	0,00069	0,01666	0,15532	1,45856
0,03596	41,33095	0,00042	0,01118	0,15574	1,50346
0,03319	44,78302	0,00049	0,01397	0,15623	1,55978
0,03082	48,22390	0,00042	0,01295	0,15664	1,61181

<b>25N75R</b>					
<b><i>Diâmetro do poro [μm]</i></b>	<b><i>Pressão de intrusão [MPa]</i></b>	<b><i>Incremental Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Log Differential Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Cumulative Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Cumulative Pore Area [m²/g]</i></b>
0,02876	51,67360	0,00038	0,01274	0,15702	1,66313
0,02696	55,12296	0,00031	0,01103	0,15733	1,70759
0,02538	58,56483	0,00027	0,01036	0,15761	1,74925
0,02396	62,01507	0,00025	0,01001	0,15785	1,78960
0,02270	65,45872	0,00022	0,00923	0,15807	1,82672
0,02157	68,90178	0,00019	0,00849	0,15826	1,86087
0,01725	86,15088	0,00065	0,00672	0,15891	1,99514
0,01438	103,37265	0,00035	0,00441	0,15926	2,08348
0,01232	120,61979	0,00022	0,00334	0,15948	2,15052
0,01078	137,86290	0,00011	0,00197	0,15960	2,19011
0,00958	155,08614	0,00003	0,00000	0,15963	2,20240
0,00862	172,34572	0,00008	0,00000	0,15971	2,23562
0,00784	189,57211	0,00000	0,00000	0,15971	2,23562
0,00719	206,79173	0,00000	0,00000	0,15971	2,23561

Tabela I. 29 - Valores de ensaio de porosimetria de mercúrio para argamassa 50N50R

<b>50N50R</b>					
<b><i>Diâmetro do poro [μm]</i></b>	<b><i>Pressão de intrusão [MPa]</i></b>	<b><i>Incremental Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Log Differential Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Cumulative Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Cumulative Pore Area [m²/g]</i></b>
426,01080	0,00349	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
108,90194	0,01365	0,00394	0,00665	0,00394	0,00006
72,34508	0,02054	0,00373	0,02098	0,00767	0,00022
54,15355	0,02744	0,00240	0,01909	0,01007	0,00038
43,31923	0,03431	0,00547	0,05637	0,01554	0,00082
36,06154	0,04121	0,00468	0,05879	0,02022	0,00130
30,91690	0,04807	0,00493	0,07377	0,02515	0,00188
27,05609	0,05493	0,01077	0,18586	0,03592	0,00337
24,05078	0,06179	0,00447	0,08735	0,04038	0,00407
21,63075	0,06870	0,00434	0,09418	0,04472	0,00483
17,31048	0,08585	0,00924	0,09544	0,05396	0,00673
14,39180	0,10326	0,00591	0,07373	0,05987	0,00822
12,34300	0,12040	0,00400	0,06001	0,06387	0,00942
10,80226	0,13758	0,00273	0,04712	0,06660	0,01036
8,63285	0,17215	0,00370	0,03801	0,07030	0,01188
7,19601	0,20652	0,00255	0,03222	0,07285	0,01317
5,59249	0,26574	0,00187	0,01704	0,07471	0,01434
4,52643	0,32832	0,00188	0,02050	0,07660	0,01583
3,70953	0,40063	0,00230	0,02659	0,07889	0,01806
3,13720	0,47371	0,00167	0,02297	0,08057	0,02001

<b>50N50R</b>					
<b><i>Diâmetro do poro [μm]</i></b>	<b><i>Pressão de intrusão [MPa]</i></b>	<b><i>Incremental Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Log Differential Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Cumulative Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Cumulative Pore Area [m²/g]</i></b>
2,76973	0,53656	0,00121	0,02233	0,08177	0,02165
2,43845	0,60946	0,00131	0,02366	0,08308	0,02366
2,19094	0,67831	0,00098	0,02098	0,08406	0,02534
1,74464	0,85183	0,00212	0,02147	0,08618	0,02966
1,45110	1,02414	0,00173	0,02162	0,08791	0,03399
1,24987	1,18903	0,00145	0,02229	0,08936	0,03827
1,09079	1,36244	0,00127	0,02148	0,09063	0,04261
0,96260	1,54386	0,00120	0,02204	0,09182	0,04728
0,86938	1,70942	0,00111	0,02511	0,09294	0,05213
0,78996	1,88126	0,00116	0,02787	0,09409	0,05772
0,72400	2,05265	0,00117	0,03079	0,09526	0,06388
0,66616	2,23089	0,00127	0,03506	0,09653	0,07117
0,61937	2,39941	0,00138	0,04361	0,09791	0,07976
0,57755	2,57314	0,00153	0,05034	0,09944	0,08997
0,54036	2,75024	0,00168	0,05812	0,10112	0,10199
0,51003	2,91381	0,00182	0,07260	0,10294	0,11587
0,48012	3,09532	0,00198	0,07561	0,10492	0,13190
0,45559	3,26197	0,00202	0,08864	0,10694	0,14916
0,43269	3,43465	0,00200	0,08917	0,10894	0,16715
0,39276	3,78377	0,00398	0,09464	0,11292	0,20572
0,35983	4,13014	0,00333	0,08755	0,11625	0,24112
0,33180	4,47904	0,00285	0,08092	0,11910	0,27408
0,30877	4,81303	0,00238	0,07617	0,12148	0,30380
0,28845	5,15213	0,00198	0,06712	0,12346	0,33038
0,27030	5,49812	0,00167	0,05930	0,12514	0,35435
0,25442	5,84114	0,00145	0,05504	0,12658	0,37640
0,23963	6,20182	0,00129	0,04963	0,12787	0,39732
0,22690	6,54970	0,00110	0,04623	0,12897	0,41610
0,21585	6,88490	0,00096	0,04407	0,12992	0,43336
0,17278	8,60115	0,00365	0,03772	0,13357	0,50842
0,14401	10,31958	0,00242	0,03062	0,13599	0,56959
0,12324	12,05929	0,00180	0,02655	0,13779	0,62336
0,10796	13,76618	0,00141	0,02455	0,13920	0,67220
0,09587	15,50158	0,00116	0,02248	0,14036	0,71770
0,08579	17,32346	0,00094	0,01947	0,14130	0,75907
0,07852	18,92579	0,00071	0,01849	0,14201	0,79365
0,07196	20,65346	0,00072	0,01891	0,14273	0,83180
0,06644	22,36786	0,00063	0,01820	0,14336	0,86824
0,06169	24,09112	0,00052	0,01610	0,14388	0,90065
0,05752	25,83752	0,00051	0,01688	0,14439	0,93507

<b>50N50R</b>					
<i><b>Diâmetro do poro [μm]</b></i>	<i><b>Pressão de intrusão [MPa]</b></i>	<i><b>Incremental Intrusion [ml/g]</b></i>	<i><b>Log Differential Intrusion [ml/g]</b></i>	<i><b>Cumulative Intrusion [ml/g]</b></i>	<i><b>Cumulative Pore Area [m²/g]</b></i>
0,05397	27,53373	0,00042	0,01527	0,14481	0,96534
0,05077	29,27212	0,00039	0,01464	0,14520	0,99506
0,04793	31,00409	0,00035	0,01421	0,14556	1,02381
0,04541	32,72875	0,00032	0,01374	0,14588	1,05150
0,04314	34,44732	0,00030	0,01351	0,14618	1,07862
0,03923	37,88265	0,00053	0,01292	0,14671	1,13041
0,03595	41,33942	0,00047	0,01227	0,14718	1,17992
0,03319	44,78304	0,00040	0,01163	0,14758	1,22670
0,03082	48,22026	0,00035	0,01105	0,14794	1,27106
0,02876	51,67591	0,00030	0,01002	0,14824	1,31149
0,02696	55,11597	0,00027	0,00962	0,14851	1,35013
0,02538	58,56349	0,00025	0,00940	0,14875	1,38799
0,02396	62,01532	0,00023	0,00922	0,14898	1,42519
0,02270	65,46029	0,00017	0,00742	0,14916	1,45503
0,02157	68,90383	0,00020	0,00885	0,14935	1,49065
0,01725	86,14768	0,00064	0,00664	0,15000	1,62332
0,01437	103,38410	0,00031	0,00396	0,15031	1,70261
0,01232	120,62130	0,00012	0,00176	0,15043	1,73793
0,01078	137,85700	0,00020	0,00347	0,15063	1,80755
0,00958	155,09592	0,00000	0,00000	0,15063	1,80755
0,00862	172,34394	0,00000	0,00000	0,15063	1,80755
0,00784	189,55819	0,00000	0,00000	0,15063	1,80754
0,00719	206,81676	0,00000	0,00000	0,15063	1,80754

Tabela I. 30 - Valores de ensaio de porosimetria de mercúrio para argamassa 75N25R

<b>75N25R</b>					
<i><b>Diâmetro do poro [μm]</b></i>	<i><b>Pressão de intrusão [MPa]</b></i>	<i><b>Incremental Intrusion [ml/g]</b></i>	<i><b>Log Differential Intrusion [ml/g]</b></i>	<i><b>Cumulative Intrusion [ml/g]</b></i>	<i><b>Cumulative Pore Area [m²/g]</b></i>
425,20190	0,00350	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
108,84599	0,01365	0,00469	0,00793	0,00469	0,00007
72,40217	0,02053	0,00169	0,00954	0,00638	0,00014
54,16682	0,02744	0,00320	0,02541	0,00958	0,00035
43,30335	0,03432	0,00435	0,04478	0,01394	0,00070
36,07848	0,04119	0,00554	0,06985	0,01947	0,00126
30,92676	0,04805	0,00442	0,06604	0,02389	0,00179
27,04822	0,05494	0,00413	0,07104	0,02803	0,00236
24,04490	0,06181	0,00428	0,08366	0,03230	0,00303
21,63175	0,06870	0,00453	0,09860	0,03683	0,00382
17,31188	0,08584	0,00694	0,07175	0,04377	0,00525

<b>75N25R</b>					
<i><b>Diâmetro do poro [µm]</b></i>	<i><b>Pressão de intrusão [MPa]</b></i>	<i><b>Incremental Intrusion [ml/g]</b></i>	<i><b>Log Differential Intrusion [ml/g]</b></i>	<i><b>Cumulative Intrusion [ml/g]</b></i>	<i><b>Cumulative Pore Area [m²/g]</b></i>
14,39430	0,10324	0,01978	0,24680	0,06356	0,01024
12,34059	0,12043	0,00431	0,06446	0,06787	0,01153
10,79934	0,13761	0,00307	0,05299	0,07094	0,01259
8,63107	0,17218	0,00425	0,04371	0,07519	0,01434
7,19328	0,20660	0,00303	0,03824	0,07822	0,01587
5,65868	0,26263	0,00215	0,02061	0,08036	0,01721
4,49334	0,33074	0,00244	0,02437	0,08280	0,01913
3,68130	0,40370	0,00230	0,02654	0,08510	0,02138
3,17124	0,46863	0,00159	0,02454	0,08669	0,02324
2,78496	0,53363	0,00136	0,02413	0,08805	0,02507
2,45372	0,60566	0,00126	0,02286	0,08931	0,02699
2,20361	0,67441	0,00099	0,02113	0,09030	0,02868
1,75872	0,84500	0,00216	0,02206	0,09246	0,03304
1,44944	1,02531	0,00181	0,02159	0,09427	0,03757
1,24504	1,19364	0,00000	0,00000	0,09427	0,03757
1,08813	1,36577	0,00000	0,00000	0,09427	0,03757
0,95761	1,55192	0,00000	0,00000	0,09427	0,03757
0,86611	1,71586	0,00000	0,00000	0,09427	0,03757
0,78815	1,88559	0,00000	0,00000	0,09427	0,03757
0,72268	2,05642	0,00251	0,06665	0,09678	0,05086
0,66853	2,22299	0,00313	0,09241	0,09991	0,06883
0,61678	2,40950	0,00356	0,10170	0,10347	0,09098
0,57742	2,57373	0,00359	0,12547	0,10706	0,11505
0,54037	2,75021	0,00355	0,12326	0,11061	0,14046
0,50888	2,92038	0,00332	0,12728	0,11393	0,16576
0,48106	3,08925	0,00312	0,12792	0,11705	0,19100
0,45487	3,26716	0,00293	0,12063	0,11998	0,21607
0,43361	3,42731	0,00259	0,12470	0,12258	0,23941
0,39287	3,78278	0,00456	0,10629	0,12713	0,28351
0,36101	4,11657	0,00375	0,10217	0,13088	0,32332
0,33196	4,47688	0,00320	0,08769	0,13408	0,36021
0,30914	4,80732	0,00261	0,08429	0,13669	0,39274
0,28836	5,15370	0,00231	0,07656	0,13900	0,42371
0,27000	5,50408	0,00183	0,06395	0,14083	0,44988
0,25433	5,84336	0,00164	0,06294	0,14246	0,47483
0,23986	6,19575	0,00145	0,05701	0,14391	0,49830
0,22739	6,53565	0,00128	0,05502	0,14519	0,52015
0,21592	6,88280	0,00116	0,05149	0,14634	0,54104
0,17267	8,60661	0,00439	0,04519	0,15073	0,63134
0,14380	10,33449	0,00309	0,03889	0,15382	0,70945

<b>75N25R</b>					
<b><i>Diâmetro do poro [μm]</i></b>	<b><i>Pressão de intrusão [MPa]</i></b>	<b><i>Incremental Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Log Differential Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Cumulative Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Cumulative Pore Area [m²/g]</i></b>
0,12326	12,05711	0,00245	0,03657	0,15627	0,78278
0,10781	13,78419	0,00202	0,03478	0,15829	0,85279
0,09581	15,51172	0,00171	0,03340	0,16000	0,92008
0,08608	17,26366	0,00174	0,03742	0,16174	0,99657
0,07851	18,92852	0,00096	0,02394	0,16270	1,04310
0,07194	20,65768	0,00111	0,02934	0,16381	1,10232
0,06643	22,37200	0,00097	0,02795	0,16478	1,15826
-26,82536	12,02577	0,00142	0,06188	0,17781	0,74672
-28,29329	12,29807	0,00137	0,06206	0,18053	0,76371
-29,76122	12,57037	0,00132	0,06225	0,18326	0,78070
-31,22916	12,84266	0,00127	0,06244	0,18599	0,79768
-32,69709	13,11496	0,00122	0,06263	0,18872	0,81467
-34,16502	13,38726	0,00118	0,06281	0,19144	0,83165
-35,63295	13,65955	0,00113	0,06300	0,19417	0,84864
-37,10089	13,93185	0,00108	0,06319	0,19690	0,86563
-38,56882	14,20415	0,00103	0,06338	0,19963	0,88261
-40,03675	14,47645	0,00098	0,06356	0,20236	0,89960
-41,50469	14,74874	0,00093	0,06375	0,20508	0,91659
-42,97262	15,02104	0,00089	0,06394	0,20781	0,93357
-44,44055	15,29334	0,00084	0,06413	0,21054	0,95056
-45,90848	15,56563	0,00079	0,06432	0,21327	0,96754
-47,37642	15,83793	0,00074	0,06450	0,21600	0,98453
-48,84435	16,11023	0,00069	0,06469	0,21872	1,00152
-50,31228	16,38253	0,00065	0,06488	0,22145	1,01850
-51,78021	16,65482	0,00060	0,06507	0,22418	1,03549
-53,24815	16,92712	0,00055	0,06525	0,22691	1,05248
-54,71608	17,19942	0,00050	0,06544	0,22963	1,06946
-56,18401	17,47171	0,00045	0,06563	0,23236	1,08645
-57,65195	17,74401	0,00040	0,06582	0,23509	1,10344
-59,11988	18,01631	0,00036	0,06601	0,23782	1,12042
-60,58781	18,28861	0,00031	0,06619	0,24055	1,13741
-62,05574	18,56090	0,00026	0,06638	0,24327	1,15439

Tabela I. 31 - Valores de ensaio de porosimetria de mercúrio para argamassa 100N0R

<i>100N0R</i>					
<i>Diâmetro do poro [μm]</i>	<i>Pressão de intrusão [MPa]</i>	<i>Incremental Intrusion [ml/g]</i>	<i>Log Differential Intrusion [ml/g]</i>	<i>Cumulative Intrusion [ml/g]</i>	<i>Cumulative Pore Area [m<sup>2</sup>/g]</i>
425,20190	0,00350	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
108,84599	0,01365	0,01710	0,02890	0,01710	0,00026
72,40217	0,02053	0,01588	0,08969	0,03298	0,00096
54,16682	0,02744	0,01160	0,09209	0,04459	0,00169
43,30335	0,03432	0,00940	0,09666	0,05398	0,00246
36,07848	0,04119	0,00509	0,06416	0,05907	0,00297
30,92676	0,04805	0,02885	0,43111	0,08792	0,00642
27,04822	0,05494	0,00552	0,09486	0,09344	0,00718
24,04490	0,06181	0,00553	0,10823	0,09897	0,00805
21,63175	0,06870	0,00483	0,10510	0,10380	0,00889
17,31188	0,08584	0,00846	0,08741	0,11225	0,01063
14,39430	0,10324	0,00430	0,05363	0,11655	0,01171
12,34059	0,12043	0,00263	0,03935	0,11918	0,01250
10,79934	0,13761	0,00183	0,03163	0,12102	0,01313
8,63107	0,17218	0,00250	0,02570	0,12352	0,01416
7,19328	0,20660	0,00175	0,02211	0,12527	0,01505
5,66945	0,26213	0,00151	0,01458	0,12677	0,01599
4,44033	0,33469	0,00167	0,01572	0,12844	0,01731
3,72167	0,39932	0,00099	0,01286	0,12943	0,01827
3,17576	0,46796	0,00089	0,01290	0,13032	0,01930
2,75490	0,53945	0,00072	0,01170	0,13104	0,02028
2,46005	0,60411	0,00056	0,01144	0,13160	0,02114
2,20483	0,67403	0,00053	0,01112	0,13213	0,02205
1,75201	0,84824	0,00108	0,01086	0,13322	0,02424
1,45536	1,02114	0,00093	0,01157	0,13415	0,02657
1,25112	1,18784	0,00077	0,01166	0,13491	0,02883
1,08860	1,36517	0,00083	0,01380	0,13575	0,03168
0,96534	1,53949	0,00101	0,01936	0,13676	0,03562
0,86465	1,71875	0,00129	0,02693	0,13805	0,04125
0,78890	1,88379	0,00137	0,03429	0,13941	0,04785
0,72360	2,05381	0,00191	0,05082	0,14132	0,05794
0,66593	2,23166	0,00200	0,05538	0,14332	0,06944
0,61678	2,40951	0,00236	0,07098	0,14568	0,08418
0,57621	2,57913	0,00210	0,07099	0,14778	0,09825
0,53943	2,75499	0,00201	0,07017	0,14979	0,11266
0,50920	2,91858	0,00165	0,06568	0,15143	0,12521
0,48050	3,09287	0,00145	0,05747	0,15288	0,13692
0,45439	3,27059	0,00123	0,05086	0,15411	0,14748
0,43316	3,43089	0,00096	0,04635	0,15508	0,15616

<b>100N0R</b>					
<b><i>Diâmetro do poro [μm]</i></b>	<b><i>Pressão de intrusão [MPa]</i></b>	<b><i>Incremental Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Log Differential Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Cumulative Intrusion [ml/g]</i></b>	<b><i>Cumulative Pore Area [m²/g]</i></b>
0,39295	3,78198	0,00165	0,03895	0,15673	0,17212
0,36066	4,12058	0,00126	0,03374	0,15798	0,18545
0,33211	4,47485	0,00099	0,02777	0,15898	0,19694
0,30925	4,80559	0,00080	0,02574	0,15977	0,20688
0,28793	5,16147	0,00066	0,02129	0,16043	0,21573
0,27021	5,49993	0,00056	0,02045	0,16100	0,22382
0,25427	5,84471	0,00048	0,01831	0,16148	0,23120
0,24019	6,18719	0,00040	0,01633	0,16189	0,23773
0,22773	6,52576	0,00035	0,01509	0,16224	0,24370
0,21564	6,89176	0,00033	0,01403	0,16257	0,24970
0,17283	8,59860	0,00113	0,01179	0,16370	0,27303
0,14397	10,32252	0,00076	0,00952	0,16446	0,29212
0,12322	12,06107	0,00052	0,00776	0,16498	0,30783
0,10784	13,78091	0,00038	0,00660	0,16536	0,32107
0,09589	15,49763	0,00031	0,00605	0,16567	0,33317
0,08611	17,25907	0,00034	0,00737	0,16602	0,34831
0,07850	18,93112	0,00014	0,00342	0,16615	0,35499
0,07198	20,64696	0,00016	0,00417	0,16631	0,36334
0,06640	22,38034	0,00014	0,00406	0,16645	0,37155
0,06165	24,10666	0,00013	0,00403	0,16658	0,37968
0,05754	25,82591	0,00011	0,00357	0,16669	0,38684
0,05397	27,53741	0,00012	0,00414	0,16681	0,39512
0,05078	29,26432	0,00012	0,00473	0,16693	0,40465
0,04794	31,00029	0,00011	0,00434	0,16704	0,41345
0,04539	32,74470	0,00011	0,00457	0,16715	0,42276
0,04315	34,44444	0,00015	0,00677	0,16730	0,43620
0,03922	37,88965	0,00016	0,00391	0,16746	0,45194
0,03595	41,33637	0,00019	0,00501	0,16765	0,47211
0,03318	44,78612	0,00014	0,00408	0,16779	0,48857
0,03081	48,22852	0,00013	0,00393	0,16792	0,50438
0,02876	51,67373	0,00007	0,00000	0,16799	0,51406
0,02696	55,11429	0,00011	0,00388	0,16810	0,52965
0,02538	58,56642	0,00003	0,00000	0,16812	0,53382
0,02397	62,01070	0,00002	0,00000	0,16815	0,53729
0,02270	65,45460	0,00005	0,00000	0,16820	0,54639
0,02157	68,90374	0,00001	0,00000	0,16821	0,54837
0,01725	86,15189	0,00000	0,00000	0,16821	0,54837
0,01438	103,37784	0,00000	0,00000	0,16821	0,54837
0,01232	120,61856	0,00000	0,00000	0,16821	0,54837
0,01078	137,85296	0,00000	0,00000	0,16821	0,54837
0,00958	155,08828	0,00000	0,00000	0,16821	0,54837



---

<i>100N0R</i>					
<i>Diâmetro do poro [μm]</i>	<i>Pressão de intrusão [MPa]</i>	<i>Incremental Intrusion [ml/g]</i>	<i>Log Differential Intrusion [ml/g]</i>	<i>Cumulative Intrusion [ml/g]</i>	<i>Cumulative Pore Area [m<sup>2</sup>/g]</i>
0,00862	172,34308	0,00000	0,00000	0,16821	0,54837
0,00784	189,58377	0,00000	0,00000	0,16821	0,54836
0,00719	206,80868	0,00000	0,00000	0,16821	0,54836